ТОМ 8, №1, 2024
eISSN 2541-9129
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная безопасность / Technosphere Safety

Машиностроение / Machine Building

Химические технологии, науки о материалах, металлургия / Chemical Technologies, Materials Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2017 года)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Том 8, № 1, 2024

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	https://bps-journal.ru
Дата выхода в свет	28.02.2024





Safety of Technogenic and Natural Systems

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2017)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Vol. 8, no. 1, 2024

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The journal publishes articles in the following fields of science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
Materials Science (Engineering Sciences)
Fire Safety (Engineering Sciences)
Environmental Safety (Engineering Sciences)
Occupational Safety (Engineering Sciences)

Indexing and archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Name of the body that registered the publication	Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 dated Jule, 21, 2016, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	Quarterly (4 issues per year)
Address of the founder and publisher	Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	https://bps-journal.ru
Date of publication	28.02.2024



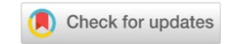
Editorial Board

Содержание

Contents

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 331.44:612.821.1:519.876.5
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-7-19

Научная статья

Методика определения параметров математической модели динамики психофизиологического состояния оператора металлургического оборудования



EDN: TGMDUK

Д.А. Вишневский, Л.Е. Подлипенская, Н.А. Денисова, Н.А. Бондарь
Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Российская Федерация
✉ natdeny@yandex.ru

Аннотация
Введение. Математическое моделирование эффективно при анализе промышленной безопасности на металлургических предприятиях, в частности для отслеживания проблем системы «человек — машина». Чтобы ввести в рассмотрение фактор времени, задействуют рекуррентные соотношения (в дискретной модели) и дифференциальные (в непрерывной). Однако необходимо также решить проблему привязки параметров модели к реальным условиям производственной среды и к человеческому фактору. Цель данного исследования — создание метода определения параметров имитационных математических моделей динамики психофизиологических показателей оператора, влияющих на его работу.

Материалы и методы. Психофизиологическое состояние (ПФС) оператора оценивали по работоспособности, утомляемости и ошибаемости. Данные собрали по тесту цифровой корректурной пробы (ЦКП). На основании полученных результатов вычислили экспериментальные значения показателей ПФС оператора, которые привели к нормированной шкале [0, 1]. Эти показатели для конкретного респондента, математическую модель и разработанный алгоритм задействовали при определении числовых значений параметров модели. Для интерпретации показателей работоспособности, утомляемости и ошибаемости ввели шкалы с пятью градациями.

Результаты исследования. Использование модифицированного авторами варианта математической модели показало значительное улучшение ее прогностических свойств. Из 10 участников наилучший результат оказался у респондента № 7, худший — у респондента № 8. В течение 1-го часа работы (с 9.00 до 10.00) их работоспособность выросла примерно одинаково, с 0,5–0,55 почти до 0,6. Затем показатель респондента № 7 активно увеличивался и до конца рабочего дня оставался существенно выше уровня «хороший». Показатель респондента № 8 падал и с 14.00 до 15.00 оказался ниже среднего. Разницу во многом определили хронотипы операторов. Их хронофизиологические особенности сказались также на утомляемости и ошибаемости. Для разных участников экспериментов варьировалось качество модели. В одном случае оно оказалось отличным (средняя относительная ошибка ≤5 %), в трех случаях — хорошим (≤10 %), в четырех — удовлетворительным (≤15 %).

Обсуждение и заключение. Предлагаемый подход дает возможность получить для каждого индивидуума динамические профили его психофизиологических характеристик, оценить их взаимосвязи и выполнить прогноз на основе модифицированной математической модели. Однако для расширения функциональных возможностей моделей в реальных условиях работы оператора металлургического оборудования требуется увеличить объем выборки, уменьшить шаг дискретного времени и выполнить исследования для различных условий работы с учетом технологических, климатических, экологических, психологических и прочих факторов.

Ключевые слова: безопасность на металлургических предприятиях, система «человек — машина», психофизиологическое состояние оператора, хронотип оператора, работоспособность оператора

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам Донбасского государственного технического университета за проявленный интерес к обсуждаемой теме, добросовестное прохождение анкетирования и интервьюирования, благодарят редакционную коллегию журнала и рецензента за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Финансирование. Исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2023-0005 в ЕГИСУ НИОКРТР).

Для цитирования. Вишневский Д.А., Подлипенская Л.Е., Денисова Н.А., Бондарь Н.А. Методика определения параметров математической модели динамики психофизиологического состояния оператора металлургического оборудования. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-7-19

Original article

Methodology for Determining the Parameters of a Mathematical Model of the Dynamics of the Psychophysiological State of a Metallurgical Equipment Operator

Dmitry A. Vishnevsky, Lidiya E. Podlipenskaya, Nataliya A. Denisova, Nadezhda A. Bondar
Donbas State Technical University, Alchevsk, Russian Federation
✉ natdeny@yandex.ru

Abstract
Introduction. Mathematical modelling is effective in the analysis of industrial safety at metallurgical plants, in particular for tracking problems of the man — machine system. To introduce the time factor, recurrence relations (in a discrete model) and differential relations (in a continuous model) are used. However, it is also necessary to solve the problem of linking the model parameters to the real conditions of the production environment and to the human factor. The aim of this study is to create a method for determining the parameters of simulation mathematical models of the dynamics of the operator's psychophysiological indicators affecting the work.
Materials and Methods. The operator's psychophysiological state (PPS) was assessed by performance, fatigue levels, and error rate. The data were collected by the Digital Correction Task (DCT) test. Based on the obtained results, the experimental values of the operator's PPS indicators, which were reduced to the normalized scale [0, 1], were calculated. These indicators for a particular respondent, the mathematical model and the developed algorithm were used to determine the numerical values of the model parameters. In order to interpret the indicators of performance, fatigue and error rate, we introduced scales with five gradations.
Results. The use of the authors' modified version of the mathematical model showed a significant improvement in its prognostic properties. Out of 10 participants the best result was shown by respondent no. 7, the worst result was shown by respondent no. 8. During the first working hour (from 9.00 to 10.00) their performance increased almost equally, from 0.5–0.55 to almost 0.6. Then the score of respondent no. 7 increased and remained well above the "good" level until the end of the day. The score of respondent no. 8 dropped and was below average from 14.00 to 15.00. The difference was largely determined by the operators' chronotypes. Their chronophysiological characteristics also affected fatigue and error rate. The model's quality varied for different participants in the experiments. In one case it was excellent (mean relative error ≤5%), in three cases it was good (≤10%) and in four it was satisfactory (≤15%).
Discussion and Conclusion. The proposed approach allows us to obtain the dynamic profiles of psychophysiological characteristics for every individual, to assess their interrelationships and to perform a prediction on the basis of a modified mathematical model. However, in order to extend the functionality of the models to the real working conditions of the metallurgical plant operator, it is necessary to increase the sample size, reduce the discrete time step and conduct studies for different working conditions, considering technological, climatic, environmental, psychological and other factors.

Keywords: safety at metallurgical enterprises, man — machine system, psychophysiological state of the operator, operator chronotype, operator performance

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the employees of the Donbass State Technical University for their interest in the topic under discussion and conscientious answers and interviews and thank the editorial board of the journal and the reviewer for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

Funding information. The researches were carried out at the expense of the federal budget (theme code: FRRU-2023-0005 in the Unified state information system for accounting the research, experimental and technical works).

For citation. Vishnevsky DA, Podlipenskaya LE, Denisova NA, Bondar NA. Methodology for Determining the Parameters of a Mathematical Model of the Dynamics of the Psychophysiological State of a Metallurgical Equipment Operator. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-7-19

Введение. Согласно данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации, к началу 2022 года на металлургических и коксохимических производствах зарегистрировано 1280 опасных производственных объектов, 19 из которых относятся к первому классу опасности, 325 — ко второму, и 922 — к третьему[1]. Как пишет журнал «Промышленные страницы»[2], в 2022 году на российских металлургических предприятиях самыми частыми происшествиями были пожары и взрывы. Эти инциденты обусловлены техническими причинами и нарушениями правил промышленной безопасности. Например, в январе 2022 года трое сотрудников Новолипецкого металлургического комбината проводили плановый осмотр межцехового газопровода без обязательной газозащитной аппаратуры. Рабочие погибли в результате отравления токсичными парами и газом.

В [1] выделены технические, санитарно-гигиенические, организационные и психофизиологические группы факторов аварийности и травматизма на металлургических и коксохимических предприятиях. Последние две группы тесно связаны с человеком — участником производственного процесса. С точки зрения производственной безопасности металлургических предприятий особая ответственность возлагается на операторов высокотехнологичных агрегатов. В инженерной психологии их принято называть «человек-оператор». В рамках представленной работы в этом значении будем употреблять слово «оператор». Иногда именно он предотвращает переход опасности в инцидент или аварию на производстве.

ГОСТ 12.0.003–2015[3] выделяет в самостоятельный блок опасные и вредные производственные факторы психофизиологического воздействия на человека. Оператор испытывает нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса[3]. В их числе:

– умственное перенапряжение;

– перенапряжение анализаторов;

– монотонность труда;

– неуверенность в действиях из-за недостатка образования и опыта.

Эмоциональные перегрузки ведут к переутомлению, плохому самочувствию, стрессовому состоянию и т. п. [1].

Надежность человека как элемента сложной технической системы зависит от внутренних и внешних условий, которые меняются во времени. Есть еще одна переменная — сам человек. Работу выполняют люди с разными личностными качествами, здоровьем, опытом и пр.

В [2] исследовались сведения о несчастных случаях (НС) в кузнечно-прессовом производстве (КПП) за 1985, 1987 и 1989 гг. Отмечены некоторые особенности в распределении по количеству часов от начала работы до инцидента. Эти закономерности можно объяснить человеческим фактором, точнее суточным ритмом трудовой деятельности (рис. 1).

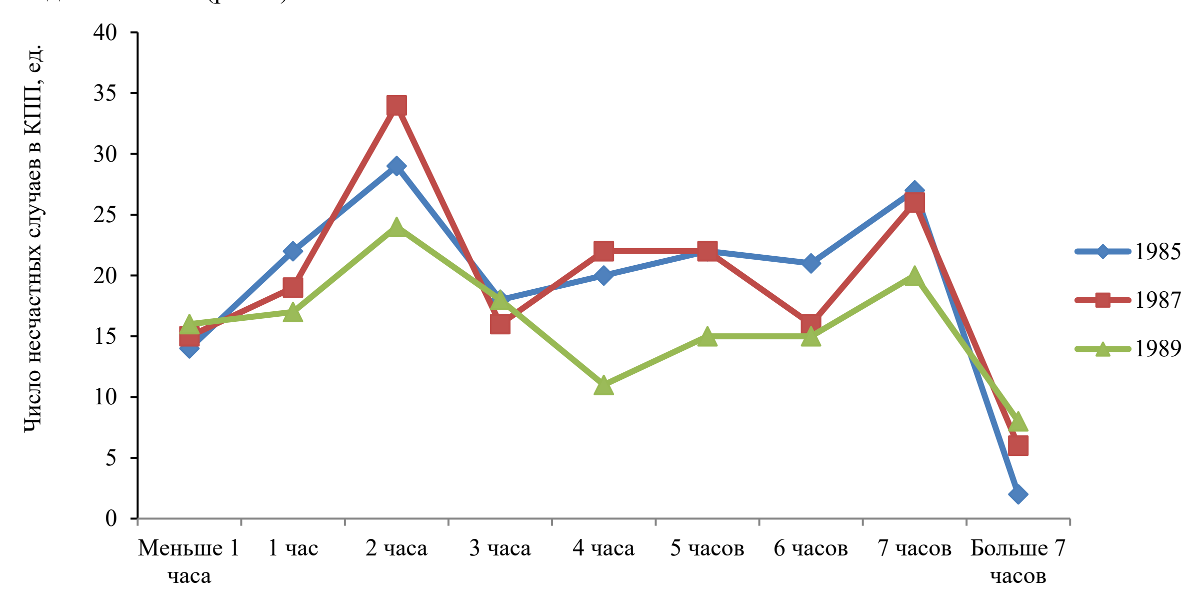


Рис. 1. Распределение НС в кузнечно-прессовом производстве по количеству часов от начала работы до НС [2]

---

[1] Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году. Москва: 2022. С. 407. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20за%202021%20г.pdf (дата обращения: 22.11.2023).

[2] Опасная тенденция: аварии и ЧС на металлургических производствах в 2022–2023 годах. *Промышленные страницы*. URL: https://indpages.ru/safe/avareeee-na-myetallurgeechyeskeeh-proeezvodstvah/?ysclid=lnshtjh0z2208396380 (дата обращения: 22.11.2023).

[3] ГОСТ 12.0.03–2015. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200136071 (дата обращения: 21.11.2023).

На графиках рис. 1 достаточно выражена синхронность пиков, а также минимальная аварийность в последние часы работы. Значит, время работы оператора — существенный фактор возникновения несчастного случая на производстве.

В [3] экспериментально установлена необходимость учитывать хронотип оператора при определении профессионально важных качеств.

Для предприятий металлургической отрасли методы математического моделирования эффективны при анализе ситуаций, которые:

– связаны с промышленной безопасностью;

– могут возникнуть в сложной технической системе «человек — машина»;

– формируются и развиваются в различных условиях внутренней и внешней среды.

Математические модели, описывающие психофизиологическое состояние оператора, разрабатывались в различных математических постановках. При этом задействовали инструментарий измерения первичных показателей. В.Г. Абашин выяснил, как использование биометрических технологий связано с психофизиологическим состоянием оператора автоматического рабочего места, его работоспособностью, снижением количества брака и аварий технологического процесса по вине человека [4]. Работоспособность оператора моделируется по клавиатурному почерку. С этой целью применяют нечеткие множества как основу адаптивных моделей — биометрической и мультибиометрической [5].

Авторы [6] используют в математической модели биометрические признаки (голос, клавиатурный почерк и характер работы с компьютерной мышью). Это позволяет судить о психофизиологическом состоянии оператора: норма, усталость, опьянение, возбуждение, расслабление (засыпание). Модели базируются на стратегии Байеса, а также нейросетевом подходе и позволяют оценить уровень ПФС оператора и спрогнозировать его способность к выполнению текущих операций.

В [7] разработаны имитационные математические модели взаимосвязи факторов психофизиологического состояния оператора. Авторы задействовали рекуррентные соотношения в дискретной модели и системы дифференциальных уравнений в непрерывной модели, что позволяет ввести в рассмотрение фактор времени. В этом случае параметры модели определяются по:

– результатам тестирования конкретного работника;

– его способности к определенному виду деятельности;

– итогам экспериментальных исследований рабочего места и функциональных действий оператора.

Эта часть моделирования меньше других формализуется и в наибольшей степени влияет на возможности использования модели для корректировки реальных действий оператора. В настоящее время проблема не решена. Таким образом, сохраняют актуальность вопросы определения параметров математических моделей, которые могут корректно описать взаимосвязи различных факторов психофизиологического состояния оператора. Цель данной статьи — разработка методики определения параметров таких моделей. Научные изыскания в данной сфере будут способствовать выявлению показателей состояния оператора металлургического оборудования, которые влияют на его функциональные характеристики и могут стать причиной серьезных ошибок с негативными последствиями.

Материалы и методы. Для оценки психофизиологического состояния оператора выбрали следующие показатели:

– работоспособность (возможность целенаправленно выполнять работу определенного количества и качества за обозначенное время);

– утомляемость (снижение работоспособности с нарушением координации движений, падением концентрации внимания и точности решений [8]);

– ошибаемость (оценивается количеством ошибочных действий).

Утомление определяется по субъективным и объективным признакам [9]. Субъективный уровень утомления устанавливали по шкале оценки усталости[4] (fatigue assessment scale, FAS) [10]. Ее разработала группа нидерландских ученых под руководством Х. Михильсен (H.J. Michielsen). Это 10 вопросов о ежедневном самочувствии респондента.

В качестве источника объективных параметров в данной работе использовали тест цифровой корректурной пробы (ЦКП)[5]. По его результатам вычислялись экспериментальные значения показателей психофизиологического состояния оператора. Числовые значения параметров модели определяются по названным показателям для конкретного респондента в совокупности с используемой моделью.

[4] Шкала оценки усталости: Fatigue Assessment Scale (FAS). URL: https://wasog.org/dynamic/media/78/documents/Questionairres/fas_rus_anon.html (дата обращения: 21.11.2023).

[5] Цифровая корректурная проба. URL: https://metodorf.ru/tests/korrekt/korrektchis.php (дата обращения: 18.08.2023).

Задача подбора параметров математической модели взаимосвязи различных психофизиологических факторов оператора решается в два этапа.

1-й — экспериментальный. Участников тестируют, собирают данные об условиях работы оператора и его личностных качествах, которые могут влиять на исследуемые параметры трудовой деятельности.

2-й — расчетный. Используется база данных, собранных на 1-м этапе. С учетом выбранной математической модели оцениваются ее параметры для каждого конкретного работника. При достаточном объеме статистических данных в широком диапазоне варьируемых параметров строятся усредненные модели, которые можно применить для прогнозирования изменения психофизиологических показателей работы оператора в различных условиях и с учетом временного фактора.

В данном исследовании для электронного тестирования использовали программу, представленную интернет-ресурсом «Интерактивный портал — книга методик саморазвития и достижения успеха»[6].

При выполнении ЦКП испытуемый строка за строкой просматривал сгенерированный программой числовой массив и зачеркивал цифры, указанные в задании. На выполнение теста давали 3 минуты. Затем программа выдала описанные ниже результаты.

1. Основные первичные показатели:

– время выполнения теста t;
– общее количество просмотренных цифр до последней выбранной цифры N;
– общее количество просмотренных строк C;
– общее количество цифр, которые необходимо вычеркнуть n;
– общее количество вычеркнутых цифр M;
– число верных ответов S;
– число пропущенных цифр P;
– число ошибочно выбранных цифр O.

2. Расчетные показатели, характеризующие:

– скорость (производительность) внимания A;
– точность работы T (в трех вариантах);
– умственную продуктивность E;
– умственную работоспособность A_u;
– концентрацию внимания K;
– устойчивость концентрации внимания K_u;
– объем зрительной информации V;
– скорость переработки информации Q.

Для решения поставленной задачи отобрали показатели, на основе которых оценивались работоспособность X, утомляемость Y и ошибаемость Z оператора по формулам (1–4).

1. Умственная работоспособность A_u (по цифровой корректурной пробе[7], единица измерения — знаков в секунду):

$$A_u = (N/t) \times ((M-(O+P))/n)\,. \tag{1}$$

Для приведения показателя к нормализованной шкале [0, 1] в безразмерных единицах авторы предлагают формулу (2). Результатом будет i-тое значение показателя работоспособности X (соответствует дискретному условному времени i):

$$x_i = A_{ui} \big/ \max\{A_u\}\,, \tag{2}$$

где $max\{A_u\}$ — максимально возможное значение умственной работоспособности по данному виду теста независимо от тестируемого работника.

Рассмотрим стандартный тест ЦКП с 1600 цифрами. Допустим, респондент за 180 секунд полностью и правильно выполнит тест. В этом случае величина $max\{A_u\}$ составит 8,889 знаков в секунду. Если же тестируемый выполнит тест менее чем за 180 с, значение X при расчете по формуле (2) может оказаться больше 1. Тогда для X принимается значение 1.

2. Утомляемость Y оценивается по показателю K (концентрация внимания):

$$Y = (1 - K/100)\,, \tag{3}$$

где $K = (M–0)\ n\ \ 100$ — коэффициент, характеризующий концентрацию внимания, %.

[6] Интерактивный портал — книга методик саморазвития и достижения успеха. URL: https://metodorf.ru/ (дата обращения: 18.10.2023).
[7] Цифровая корректурная проба. URL: https://metodorf.ru/tests/korrekt/korrektchis.php (дата обращения: 18.10.2023).

Данный показатель Y принимает безразмерные значения в интервале [0, 1].

3. Ошибаемость Z предлагается оценить по формуле:

$$Z = (O + P) / (M + P). \tag{4}$$

Данный показатель также принимает значения в интервале [0, 1].

В дальнейшем будем характеризовать X, Y и Z как унифицированные количественные индикаторы психофизиологического состояния оператора, связанные с его основной производственной деятельностью. Для трактовки показателей X, Y и Z разработана шкала, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Интерпретация значений показателей в качественной форме

Показатель	Интервалы значений показателей / качественная характеристика				
Работоспособность X	[0–0,20] низкая	[0,20–0,40] ниже средней	[0,40–0,60] средняя	[0,60–0,80] хорошая	[0,80–1,00] высокая
Утомляемость Y	[0–0,20] низкая	[0,20–0,40] ниже средней	[0,40–0,60] средняя	[0,60–0,80] выше средней	[0,80–1,00] высокая
Ошибаемость Z	[0–0,01] незначительная	[0,01–0,05] заметная	[0,05–0,10] существенная	[0,10–0,20] значительная	[0,20–1,00] высокая

Показатели X, Y и Z — безразмерные, унифицированные со значениями в интервале [0, 1].

На втором этапе для подбора параметров математической модели есть два способа.

1. При помощи модуля «Поиск решения» программы Excel создается сценарий решения системы для некоторых начальных параметров. В его основе — система рекуррентных уравнений математической модели в дискретной форме. Затем «Поиск решения» выдает оптимальные значения параметров модели для целевой функции, равной сумме квадратов отклонений расчетных значений показателей X, Y и Z от экспериментальных.

2. В программе Anylogic[8], которая позволяет в автоматическом режиме подбирать параметры рассматриваемых математических моделей в дискретной форме рекуррентных соотношений и в виде системы дифференциальных уравнений. Anylogic целесообразно использовать после анализа результатов предварительной оценки параметров модели с помощью модуля «Поиск решения» Excel.

Для апробации предлагаемой методики отобрали 10 человек — студентов и сотрудников Донбасского государственного технического университета. Они работали как операторы на учебных тренажерах с автоматическим и полуавтоматическим управлением. В начале и в конце рабочего дня оценивался субъективный уровень утомления по шкале FAS. В начале каждого часа, с 9.00 до 16.00, выполнялись тесты ЦКП. Данные обрабатывали по формулам (1–4) для каждого респондента. Результаты тестирования и их унификацию (X, Y и Z) использовали на втором этапе для определения параметров математической модели.

В данной работе применили модель в рекуррентной форме [7], которая описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + a_1 \dfrac{x_i}{d_1 x_i + c_1} \cdot (1 - \dfrac{x_i}{k_1}) - b_1 x_i y_i - h x_i z_i, \\ y_{i+1} = y_i + a_2 \dfrac{y_i}{d_2 y_i + c_2} \cdot (1 - \dfrac{y_i}{k_2}) + b_2 x_i y_i, \\ z_{i+1} = z_i + a_3 \dfrac{z_i}{d_3 z_i + c_3} \cdot (1 - \dfrac{z_i}{k_3}) + b_3 y_i z_i. \end{cases} \tag{5}$$

Решением системы (5) являются три сопряженных временных ряда длиной m индикаторов $X = \{x_i, i=0, 1, 2, ..., m\}$, $Y = \{y_i, i=0, 1, 2, ..., m\}$, $Z = \{z_i, i=0, 1, 2, ..., m\}$. Индекс i — переменная, характеризующая дискретное время в системе. Параметры a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j (j = 1, 2, 3) определяются в результате решения оптимизационной задачи по исходным данным тестирования.

[8] AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: https://www.anylogic.ru/ (дата обращения: 12.11.2023).

Математическая модель оптимизационной задачи описывается системой ограничений (6) и целевой функцией (7).

$$\begin{cases} \delta_{xi}(a_j,b_j,k_j,h,d_j,c_j)=(x_i^{\phi}-x_i^{p})^2\le\Delta, \\ \delta_{yi}(a_j,b_j,k_j,h,d_j,c_j)=(y_i^{\phi}-y_i^{p})^2\le\Delta, \\ \delta_{zi}(a_j,b_j,k_j,h,d_j,c_j)=(z_i^{\phi}-z_i^{p})^2\le\Delta, \\ a_j,b_j,k_j,h,d_j,c_j\ge 0, \\ x_i^{p}\ge 0, y_i^{p}\ge 0, z_i^{p}\ge 0, \\ x_i^{p}\le 1, y_i^{p}\le 1, z_i^{p}\le 1, \\ i=1,\dots,m, \\ j=1,2,3. \end{cases} \quad (6)$$

$$\Psi(a_j,b_j,k_j,h,d_j,c_j)=\sum_{i=1}^{m}\delta_{xi}+\sum_{i=1}^{m}\delta_{yi}+\sum_{i=1}^{m}\delta_{zi}\to min. \quad (7)$$

Здесь индексом *ф* помечены фактические значения индикаторов *X*, *Y* и *Z*, найденные в результате обработки данных тестирования оператора, *p* — расчетные значения *X*, *Y* и *Z*, определяемые из решения системы (5) и зависящие от искомых в данной задаче оптимизации переменных a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j (j = 1, 2, 3). На варьируемые переменные a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j ограничения задаются по максимально допустимому значению Δ квадратов отклонений (δ_{xi}, δ_{yi}, δ_{zi}) расчетных значений *X*, *Y* и *Z* от фактических для всех *m* значений рассматриваемых временных рядов. Целевая функция $\Psi(a_j, b_j, k_j, h, d_j, c_j)$ равна сумме квадратов отклонений (δ_{xi}, δ_{yi}, δ_{zi}).

Для решения оптимизационной задачи применялся метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ).

Результаты исследования. 1-й этап — экспериментальный. Результаты тестирования участников эксперимента (респонденты №1–№10), преобразованные к унифицированным показателям *X*, *Y* и *Z*, представлены на диаграммах размаха (рис. 2–4). В виде точки показан центр распределения (медиана), прямоугольник обозначает границы варьирования (квартили 25 % – 75 %), «усики» — нижнюю и верхнюю границу значений показателя (min — max). Диаграммы выполнены с помощью программного комплекса «Statistica».

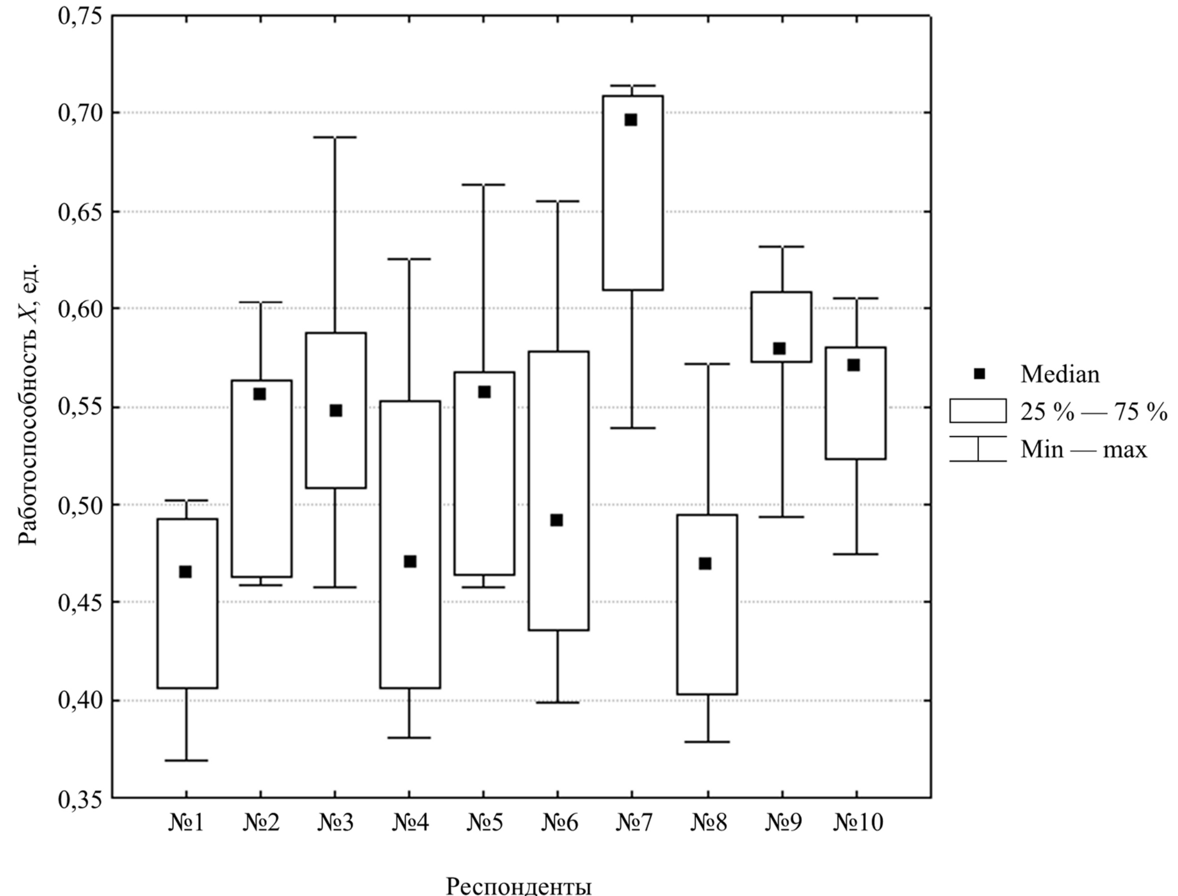


Рис. 2. Показатели работоспособности операторов

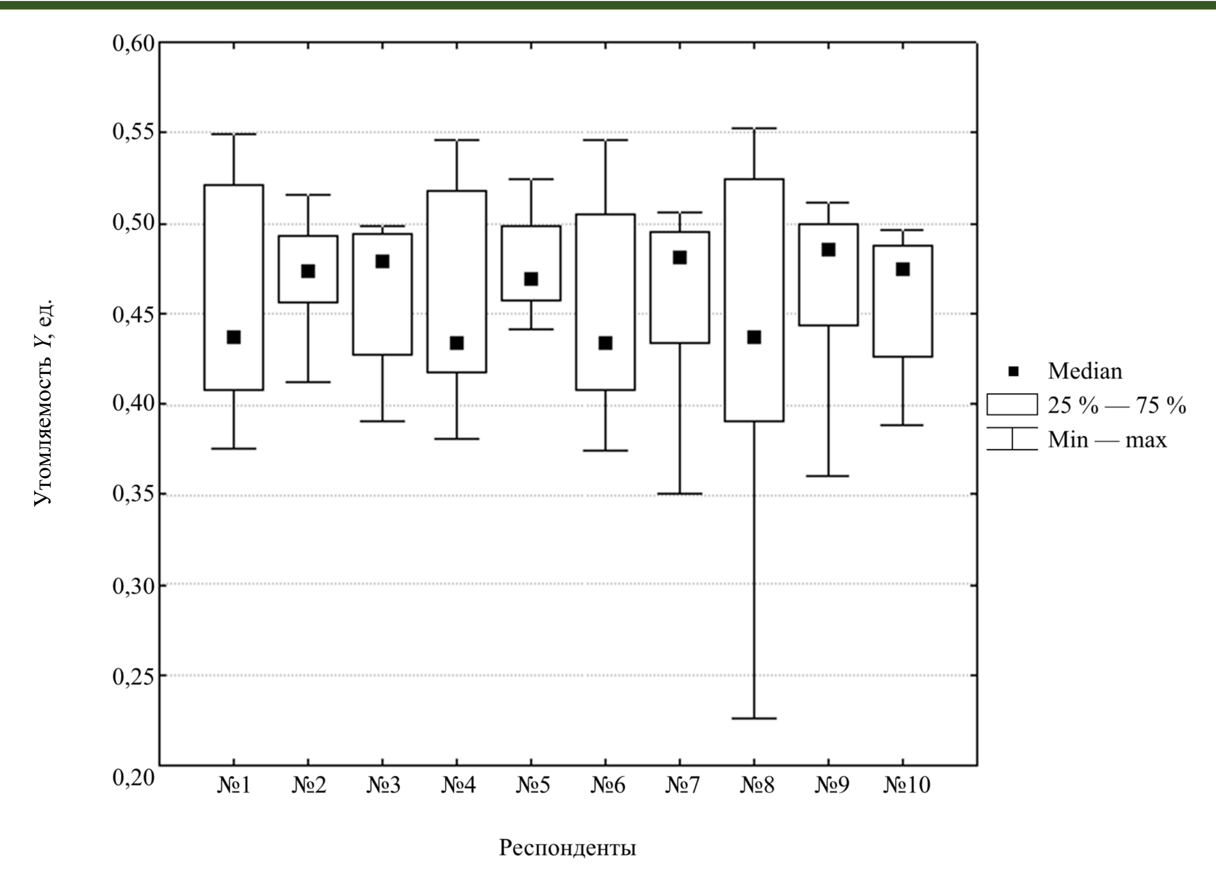


Рис. 3. Показатели утомляемости операторов

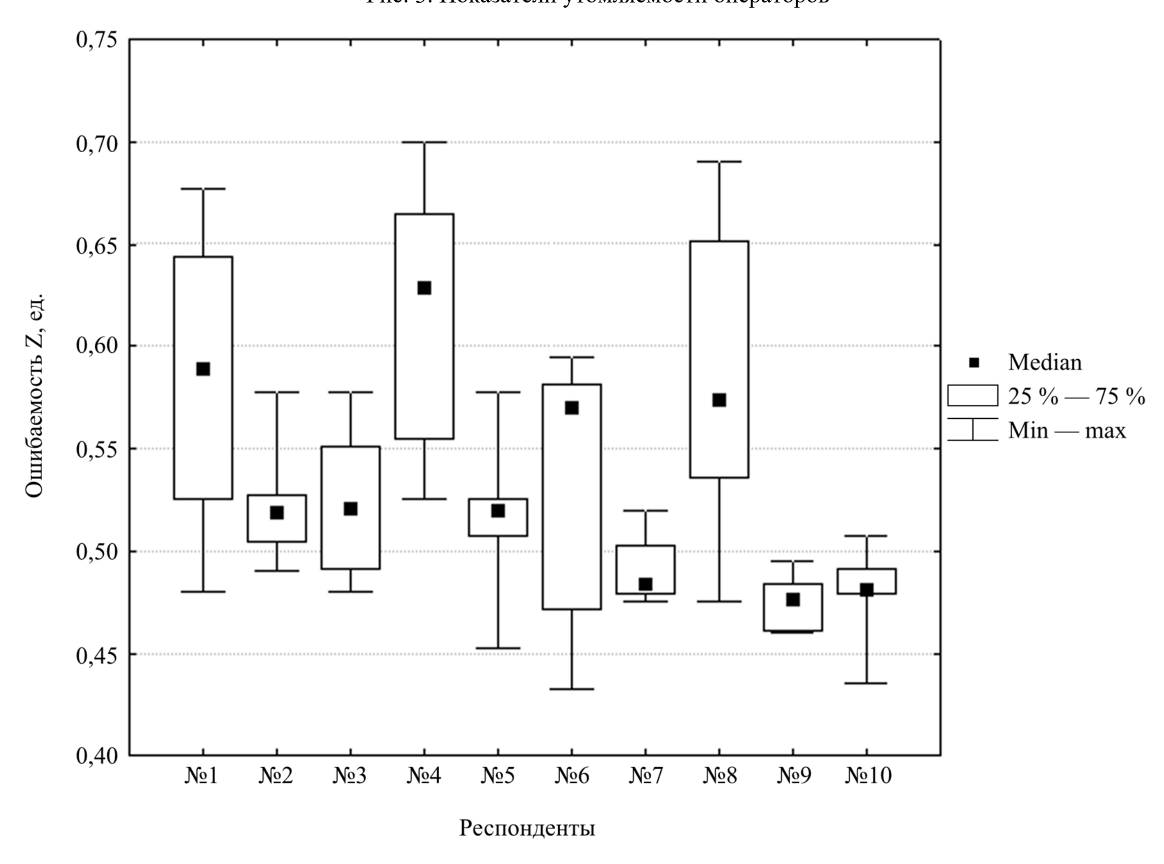


Рис. 4. Показатели ошибаемости операторов

Анализ рис. 2–4 позволил выделить респондентов с лучшими и худшими оценками их деятельности (таблица 2). Учитывались уровни показателей *X*, *Y* и *Z*, соотнесенные с градациями таблицы 1, а также квартили и интервалы варьирования показателей.

Таблица 2

Ранжирование респондентов по результатам тестирования

Критерий оценки	Варианты (№ респондента)	
	наихудшие	наилучшие
Работоспособность *X* (чем больше, тем лучше)	8, 1, 4, 6	7, 9, 3
Утомляемость *Y* (чем больше, тем хуже)	8, 1, 4, 6	7, 10
Ошибаемость *Z* (чем больше, тем хуже)	4, 8, 1	9, 10, 7
Интегрально (с учетом *X*, *Y*, *Z*)	8, 4, 1	7, 10, 9

Графики на рис. 5 отражают динамику работоспособности для респондентов № 7 (пунктирная линия, лучший результат) и № 8 (сплошная линия, худший результат).

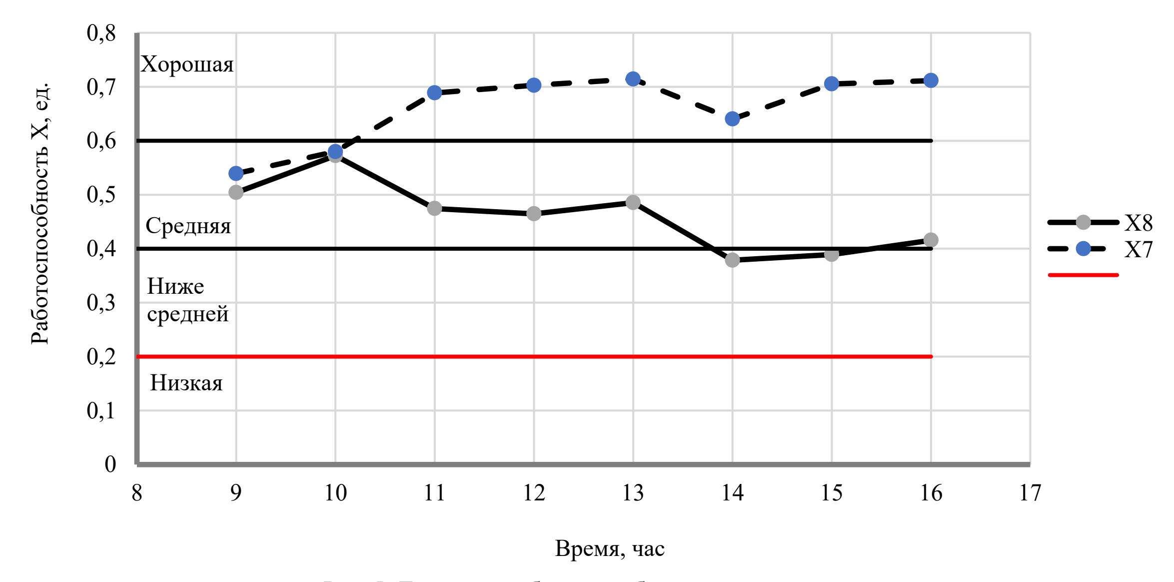


Рис. 5. Динамика работоспособности операторов

Для объяснения достаточно большой разницы данных респондентов 7 и 8 учитывали их возраст, пол, род занятий, самочувствие и др. Наиболее существенным оказался фактор хронотипа. Классификация, принятая в 1970 году, подразумевает три категории людей с отличительными поведенческими признаками и генетической разницей биоритмов. Это так называемые «жаворонки», «совы» и «голуби» [11]. Респондент № 8 по хронотипу — «жаворонок», № 7 — «сова». В результате работоспособность № 8 снижается к концу дня, а № 7 — повышается (рис. 5). Хронофизиологические особенности операторов проявляются также в динамике их утомляемости и ошибаемости.

2-й этап — расчетный. Получены параметры модели (5), рассчитанные для каждого участника эксперимента. С этой целью решили оптимизационную задачу (6)–(7). Диапазоны изменения параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3

Диапазоны параметров математической модели (5) для группы участников эксперимента

Показатель	Диапазоны параметров	Показатель	Диапазоны параметров
a_1	0,0004–0,0300	b_3	0,0001–10,1400
b_1	0–0,9700	k_3	0,0020–0,0700
k_1	0,5900–1,0000	c_1	0,0010–0,2000
h	0–1,8100	c_2	0,0001–0,0010
a_2	0–0,0010	c_3	0,0100–0,3300
b_2	0,0070–0,2600	d_1	≈ 0
k_2	0,4200–1,0000	d_2	≈ 0
a_3	0,0005–0,0600	d_3	0,0400–0,9800

В таблице 4 представлены результаты оценки качества математических моделей динамики изменения показателей *X*, *Y* и *Z*, оцениваемых по среднеквадратической ошибке модели и средней относительной ошибке для всех испытуемых.

Таблица 4

Оценка качества математических моделей

№ респондента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Средняя относительная ошибка ε, %	14,27	4,54	20,93	12,80	7,28	12,00	9,66	15,03	12,23	9,70
Среднеквадратическая ошибка, ед.	0,182	0,107	0,253	0,267	0,158	0,247	0,271	0,256	0,192	0,166

Для разных респондентов показатели качества модели варьируются в широком диапазоне. Отличное качество ($\varepsilon \le 5$ %) получено в одном случае, хорошее ($\varepsilon \le 10$ %) — в трех случаях, удовлетворительное ($\varepsilon \le 15$ %) — в четырех. Для двух случаев (№ 3 и № 8) не удалось удовлетворительно решить задачу оптимального подбора параметров математической модели. Это говорит о том, что не все влияющие факторы учтены либо модель (5) в некоторых случаях не работает.

Согласно результатам анализа алгоритма решения поставленной задачи, ряд упрощений улучшит сходимость результатов. Можно, например:

– уменьшить на 3 ед. число параметров системы (5), сократив числители и знаменатели вторых слагаемых правых частей системы на c_1, c_2, c_3 соответственно;

– удалить из системы (6) ее первое, второе и третье ограничения, переведя их в статус наблюдаемых ограничений.

В итоге алгоритм метода ОПГ будет работать лучше.

На рис. 6 и 7 приведены сравнительные диаграммы оценки качества построенных математических моделей в двух вариантах:

– 1 — исходная модель (5);

– 2 — модифицированная модель.

Как видно из диаграмм, решение задачи подбора параметров математической модели динамики показателей ПФС оператора значительно улучшено при использовании модели 2 для всех случаев, кроме № 8.

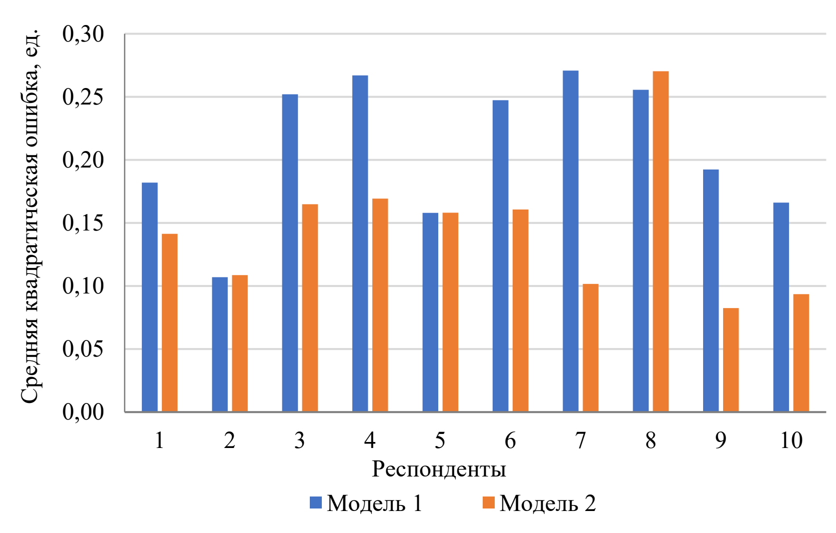


Рис. 6. Сравнение математических моделей по средней квадратической ошибке

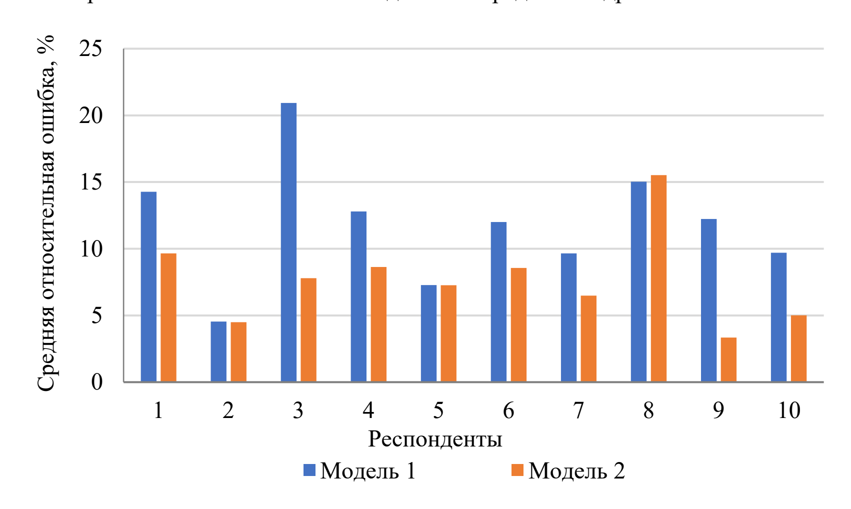


Рис. 7. Сравнение математических моделей по средней относительной ошибке

Обсуждение и заключение. Предложенный подход позволяет получить и прогнозировать для каждого индивидуума динамические профили его психофизиологических характеристик, составить математические модели взаимосвязей. Целесообразно увеличить объем выборки, уменьшить шаг дискретного времени и выполнить исследования для различных условий работы, включающие технологические, климатические, экологические, психологические и прочие факторы, которые могут влиять на эффективность работника. Это следует сделать для расширения функциональных возможностей моделей, их применения в реальных условиях работы оператора металлургического оборудования.

Обнаруженный эффект влияния хронотипа человека на его ПФС требует более основательных исследований. В статье [12], посвященной поиску компонентов циркадных часов у людей, на больших статистических выборках показано, что хронотип зависит от многих факторов (пол, возраст, график работы и др.). Все это необходимо диагностировать и учитывать в математических моделях оценки ПФС операторов.

Интересно также дополнить модель компонентами культуры производственной безопасности [13], которые можно привести к количественному виду и использовать как поправочные коэффициенты.

В дальнейшем предполагается усовершенствовать модель дополнительными переменными. Для этого нужно зафиксировать психофизиологические показатели и определять местонахождения оператора в режиме реального времени.

Представленную в работе методику можно взять за основу при решении описанных ниже задач.

– Составление и анализ динамического профиля работника при приеме на работу в качестве оператора машины, агрегата или устройства, где важны такие характеристики ПФС, как работоспособность, утомляемость и ошибаемость. Эта задача решается для конкретного человека в определенных условиях производства, что позволяет подобрать оптимальный режим работы и отдыха оператора, способствует сохранению здоровья специалиста и повышению уровня промышленной безопасности предприятия.

– Формирование и ведение специализированных баз статистических данных, включающих характеристики рабочих мест и сотрудников, в том числе их психофизиологическое состояние. На основе собранного статистического материала и систем мониторинга ПФС оператора в режиме реального времени можно строить прогнозные модели для предупреждения нештатных и аварийных ситуаций на металлургических предприятиях.

Список литературы

1. Негреева В.В., Василенок В.Л., Кагиян О.А. Исследование проблем охраны труда и их влияние на промышленную безопасность предприятий черной металлургии. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2019;(4):41–50. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50

2. Вишневский Д.А. Исследования распределения несчастных случаев в кузнечно-прессовом производстве по месту происшествия и по времени от начала работы. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2018;12(55):84–90.

3. Кудрин Р.А., Лифанова Е.В., Плотникова А.В. Биоэлектрическая активность головного мозга у операторов с разным хронотипом. *Вестник ВолГМУ*. 2019;1(69):116–119. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-1(69)-116-119

4. Абашин В.Г. *Автоматизация процесса определения психофизиологического состояния оператора автоматизированного рабочего места в АСУТП.* Автореф. дис. канд. тех. наук. Орел; 2008. 20 с. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01003315723.pdf?ysclid=lrfzw8ogf4552201100 (дата обращения: 03.11.2023).

5. Абашин В.Г. Адаптивная математическая модель мультибиометрической подсистемы определения работоспособности человека-оператора АРМ на основе нечетких множеств. *Информационные системы и технологии*. 2011;5(67):90–95. URL: https://oreluniver.ru/file/archive/ISiT%205-20111.pdf (дата обращения: 21.112023).

6. Васильев В.И., Сулавко А.Е., Борисов Р.В., Жумажанова С.С. Распознавание психофизиологических состояний пользователей на основе скрытого мониторинга действий в компьютерных системах. *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2017;(3):21–37.

7. Vishnevskiy D.A., Petrov P.A. Mathematical correlation modeling for the operator's operability, fatigue and error-making in metallurgical industry using anylogic system dynamics tools. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022;32:50–55. https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-32-50-55

8. Городецкий И.Г., Парахин А.В. Обзор физиологических, субъективных и объективных параметров для оценки работоспособности оператора. *StudNet.* 2020;3(9):699–707. https://doi.org/10.24411/2658-4964-2020-1101

9. Бубнова А.Е. Комплексная оценка субъективных и объективных физиологических характеристик критического уровня утомления у операторов МЧС. *Вестник ВолГМУ*. 2019;3(71):91–95. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-3(71)-91-95

10. Michielsen H.J., Vries J.D., Van Heck G.L. Psychometric qualities of a brief self-rated fatigue measure: the fatigue assessment scale. *Journal of Psychosomatic Research*. 2003;54(4):345–352. https://doi.org/10.1016/s0022-3999(02)00392-6

11. Глуткин С.В., Чернышева Ю.Н., Зинчук В.В., Балбатун О.А., Орехов С.Д. Физиологическая характеристика лиц с различными хронотипами. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2017;16(2):48–58. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologicheskaya-harakteristika-lits-s-razlichnymi-hronotipami/viewer (дата обращения: 21.11.2023).

12. Allebrandt K.V., Roenneberg T. The search for circadian clock components in humans: new perspectives for association studies. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. 2008;41(8):716–721. https://doi.org/10.1590/S0100-879X2008000800013

13. Суфиянова М.А., Волохина А.Т., Глебова Е.В. Разработка механизмов повышения культуры производственной безопасности по результатам анализа анкетирования работников. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(4):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79

References

1. Vasilenok VL, Negreeva VV, Kagiyan OA. Problems of labor protection and industrial safety of ferrous metallurgy enterprises. *Scientific journal NRU ITMO Series "Economics and Environmental Management"*. 2019;(4):41–50. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-41-50 (In Russ.).

2. Vishnevskyi DA. Study the accident distribution in the press-forging production at the scene and the time period from the beginning of the work. *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2018;12(55):84–90. (In Russ.).

3. Kudrin RA, Lifanova EV, Plotnikova AV. Bioelectrical activity of the brain in operators with different chronotypes. *Journal of Volgograd State Medical University*. 2019;1(69):116–119. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-1(69)-116-119 (In Russ.).

4. Abashin VG. Avtomatizatsiya protsessa opredeleniya psikhofiziologicheskogo sostoyaniya operatora avtomatizirovannogo rabochego mesta v ASUTP. Author's thesis Oryol; 2008. 20 p. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01003315723.pdf?ysclid=lrfzw8ogf4552201100 (accessed: 03.11.2023). (In Russ.).

5. Abashin VG. Adaptive mathematical model of the multibiometrics subsystem of definition of working capacity of the operator of a automated workplace on the basis of fuzzy sets. *Information Systems and Technologies.* 2011;5(67):90–95. URL: https://oreluniver.ru/file/archive/ISiT%205-20111.pdf (accessed: 21.112023). (In Russ.).

6. Vasilyev VI, Sulavko AE, Borisov RV, Zhumazhanova SS. Recognition of psychophysiological state of the user based on a hidden monitoring of computer systems. *Artificial Intelligence and Decision Making.* 2017;(3):21–37. (In Russ.).

7. Vishnevskiy DA, Petrov PA. Mathematical correlation modeling for the operator's operability, fatigue and error-making in metallurgical industry using anylogic system dynamics tools. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022;32:50–55. https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-32-50-55

8. Gorodetsky IG, Parakhin AV. Review of physiological, subjective and objective parameters for evaluating the operator performance. *StudNet.* 2020;3(9):699–707. https://doi.org/10.24411/2658-4964-2020-1101 (In Russ.).

9. Bubnova AE. The subjective and objective physiological characteristics complex assessment of the critical level of fatigue among EMERCOM operators. *Journal of Volgograd State Medical University.* 2019;3(71):91–95. https://doi.org/10.19163/1994-9480-2019-3(71)-91-95 (In Russ.).

10. Michielsen HJ, Vries JD, Van Heck GL. Psychometric qualities of a brief self-rated fatigue measure: the fatigue assessment scale. *Journal of Psychosomatic Research*. 2003;54(4):345–352. https://doi.org/10.1016/s0022-3999(02)00392-6

11. Glutkin SV, Chernyshova JN, Zinchuk VV, Balbatun AA, Orehov SD. Physiological characteristics of persons with different chronotypes. *Vestnik of Smolensk State Medical Academy*. 2017;16(2):48–58. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologicheskaya-harakteristika-lits-s-razlichnymi-hronotipami/viewer (accessed: 21.11.2023). (In Russ.).

12. Allebrandt KV, Roenneberg T. The search for circadian clock components in humans: new perspectives for association studies. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. 2008;41(8):716–721. https://doi.org/10.1590/S0100-879X2008000800013 (In Russ.).

13. Sufiyanova MA, Volokhina AT, Glebova EV. Development of mechanisms for industrial safety culture improvement based on employee survey analysis results. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79 (In Russ.).

Поступила в редакцию 21.12.2023
Поступила после рецензирования 15.01.2024
Принята к публикации 19.01.2024

Об авторах:

Дмитрий Александрович Вишневский, доктор технических наук, профессор, ректор Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), SPIN-код: 6646-4307, ORCID

Лидия Евгеньевна Подлипенская, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), SPIN-код: 8418-4319, ORCID, lida.podlipensky@gmail.com

Наталия Анатольевна Денисова, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин металлургического комплекса Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), SPIN-код: 7858-4226, natdeny@yandex.ru

Надежда Александровна Бондарь, научный сотрудник научно-исследовательской части Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), nadonet2007@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Авторы внесли равноценный вклад в постановку задачи и определение цели исследования, проведение экспериментов и расчетов, формулирование выводов и корректировку текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 21.12.2023
Revised 15.01.2024
Accepted 19.01.2024

About the Authors:

Dmitry A. Vishnevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), SPIN-code: 6646-4307, ORCID

Lidiya E. Podlipenskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Ecology and Life Safety Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), SPIN-code: 8418-4319, ORCID, lida.podlipensky@gmail.com

Nataliya A. Denisova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Machines of the Metallurgical Complex Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), SPIN-code: 7858-4226, natdeny@yandex.ru

Nadezhda A. Bondar, Researcher, Research Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, Luhansk People's Republic, 294204, RF), nadonet2007@yandex.ru

Claimed contributorship:

The authors made an equivalent contribution to the formulation of the task and the definition of the aim of the study, conducting experiments and calculations, drawing conclusions and correcting the text of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY



Check for updates

УДК 614.849
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-20-29

Научная статья



EDN: TLVZMZ

Влияние природно-климатических и географических особенностей субъектов Российской Федерации на деятельность подразделений пожарной охраны



О.В. Стрельцов ✉, Е.В. Бобринев , Е.Ю. Удавцова , А.А. Кондашов , С.И. Рюмина
Всероссийский ордена «Знак почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Российская Федерация
✉ otdel_1_3@mail.ru

Аннотация
Введение. Нормативными документами по пожарной безопасности при определении численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны в явном виде не учитываются природно-климатические и географические особенности субъектов Российской Федерации. При этом в научной литературе встречаются сведения о влиянии отдельных природно-климатических факторов на эффективность действий пожарной охраны при тушении пожаров. Целью настоящего исследования явилось определение влияния системы природно-климатических и географических характеристик субъектов Российской Федерации на показатели оперативного реагирования территориальных подразделений пожарной охраны. Полученные результаты рекомендованы для дальнейшего использования при нормировании численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны.

Методы и материалы. Проведен факторный анализ статистических данных за 2020–2022 гг. Статистические данные получены из федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных «Пожары», с сайта Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации и из других источников. Для анализа отобраны 10 показателей, характеризующих природно-климатические и географические особенности субъектов Российской Федерации, 2 показателя оперативного реагирования территориальных подразделений пожарной охраны и 4 показателя обстановки с пожарами.

Результаты исследования. Выделены пять значимых факторов, изменение которых объясняет изменение наблюдаемых показателей. Первый фактор характеризует связь климатических условий с показателями обстановки с пожарами. Второй фактор связывает показатели оперативного реагирования подразделений пожарной охраны с особенностями рельефа субъектов Российской Федерации. Третий фактор описывает взаимосвязь показателей обстановки с пожарами и показателей оперативного реагирования с плотностью населения и лесистостью территории. Остальные факторы в показатели обстановки с пожарами и оперативного реагирования существенного вклада не вносят.

Обсуждение и заключение. С помощью математического анализа и с использованием факторного моделирования авторами исследована взаимозависимость природно-климатических и географических особенностей субъектов Российской Федерации, показателей обстановки с пожарами и показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны. Определены наиболее значимые факторы, влияющие на эти показатели. Среди них средняя температура воздуха, лесистость территории, наличие горных массивов, плотность населения. Данные показатели следует учитывать при определении численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны для повышения эффективности их функционирования.

Ключевые слова: пожарная охрана, факторный анализ, субъект Российской Федерации, гибель, травматизм, время прибытия, природно-климатические и географические показатели

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Стрельцов О.В., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю, Кондашов А.А., Рюмина С.И. Влияние природно-климатических и географических особенностей субъектов Российской Федерации на деятельность подразделений пожарной охраны. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):20–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-20-29

Original article

Influence of Climatic and Geographical Features of the Subjects of the Russian Federation on the Activities of Fire Departments

Oleg V. Streltsov ✉, **Evgenii V. Bobrinev**, **Elena Yu. Udavtsova**, **Andrei A. Kondashov**, **Svetlana I. Ryumina**
The Research Institute of Fire Protection of All-Russian Order "Badge of Honor" of the EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation
✉ otdel_1_3@mail.ru

Abstract

Introduction. When determining the number and technical equipment of fire departments, regulatory documents on fire safety do not take into account natural, climatic and geographical features of the subjects of the Russian Federation in an explicit form. At the same time, there is some information in scientific literature about the influence of certain natural and climatic factors on the effectiveness of fire protection actions in extinguishing fires. The aim of this study was to determine the influence of the system of natural, climatic and geographical characteristics of the subjects of the Russian Federation on the rapid response indicators of territorial fire departments. The results obtained are recommended for further use in rationing the number and technical equipment of fire departments.

Materials and Methods. A factor analysis of statistical data for 2020–2022 was carried out. The statistical data were obtained from the Federal State Information System "Federal Database "Fires", from the website of the Federal State Statistics Service of the Russian Federation and from other sources. For the analysis, the authors selected ten indicators characterizing natural, climatic and geographical features of the subjects of the Russian Federation, two indicators of the rapid response of territorial fire departments and four indicators of the fire situation.

Results. Five significant factors were identified, the change of which explained the change in the observed indicators. The first factor characterized the relationship of climatic conditions with fire situation indicators. The second factor connected the indicators of the rapid response of fire departments with the terrain features of the subjects of the Russian Federation. The third factor described the relationship between fire situation indicators and rapid response indicators with population density and forest cover of the territory. Other factors did not significantly contribute to the indicators of fire situation and rapid response.

Discussion and Conclusion. By means of mathematical analysis and factor modeling, the authors investigated the interdependence of natural, climatic and geographical features of the subjects of the Russian Federation, fire situation indicators and indicators of rapid response of fire departments. The most significant factors influencing these indicators were identified. They included the average air temperature, the area covered by forest, the presence of mountain ranges, and population density. These indicators should be taken into account when determining the number and technical equipment of fire departments to increase the efficiency of their functioning.

Keywords: fire protection, factor analysis, subject of the Russian Federation, death, injury, arrival time, climatic and geographical indicators

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Streltsov OV, Bobrinev EV, Udavtsova EYu, Kondashov AA, Ryumina SI. Influence of Climatic and Geographical Features of the Subjects of the Russian Federation on the Activities of Fire Departments. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):20–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-20-29

Введение. При определении численности и технической оснащенности территориальных подразделений пожарной охраны проводится обследование территории субъекта Российской Федерации, которое включает в себя анализ состояния существующей системы обеспечения пожарной безопасности субъекта Российской Федерации, оперативно-тактических характеристик (особенностей) рассматриваемой территории, частоты

возникновения пожаров, рисков гибели и травмирования на них людей[1]. Среди факторов, влияющих на состояние пожарной безопасности в субъектах Российской Федерации, большое значение имеют природно-климатические и географические характеристики. В этой связи в настоящей работе с использованием факторного анализа было проведено исследование взаимосвязи природно-климатических и географических характеристик субъектов Российской Федерации, показателей оперативного реагирования территориальных подразделений пожарной охраны и показателей обстановки с пожарами. Факторный анализ является одним из наиболее широко используемых методов, направленных на выделение из множества разнородных показателей небольшого количества латентных факторов, вариация которых может объяснить изменение большей части наблюдаемых показателей [1–5]. Это позволяет построить математическую модель, в которой исследуемые факторы имеют простую и наглядную структуру [6]. Ранее авторами с использованием факторного анализа проводилось изучение оперативного реагирования подразделений пожарной охраны [7], социальных последствий пожаров [8], обстановки с пожарами в сельских поселениях [9], готовности подразделений пожарной охраны [10].

Материалы и методы. Проводимое исследование включало в себя три этапа. На первом этапе была сформирована матрица исходных показателей. Для этого в каждом субъекте Российской Федерации были определены значения 16 показателей, разбитых на три группы.

В первую группу вошли данные, характеризующие обстановку с пожарами (обозначение показателя указано в скобках):

– количество пожаров, приходящихся на 1 тыс. человек населения, ед. (Y_1);

– средний прямой материальный ущерб от одного пожара, руб. (Y_2);

– количество погибших при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, чел. (Y_3);

– количество травмированных при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, чел. (Y_4).

Во второй группе отражались показатели оперативного реагирования подразделений пожарной охраны:

– среднее время, за которое прибывает первое подразделение пожарной охраны, мин. (Z_1);

– среднее время, затрачиваемое на тушение пожара, мин. (Z_2).

Третью группу составляли показатели, характеризующие природно-климатические, географические и демографические особенности субъектов Российской Федерации:

– плотность населения, чел/км^2 (X_1);

– доля водной поверхности от площади территории субъекта, % (X_2);

– длина морской береговой линии от общей протяженности границы субъекта, % (X_3);

– доля лесов от площади территории субъекта, % (X_4);

– среднегодовое количество осадков, мм в год (X_5);

– средняя температура июля, °C (X_6);

– средняя температура января, °C (X_7);

– сейсмическая опасность (наличие населенных пунктов с указанной сейсмической интенсивностью для степени сейсмической опасности), °C (X_8);

– доля территории, занятой горами, от общей площади территории субъекта, % (X_9);

– количество солнечных дней в году, (X_{10}).

Показатели обстановки с пожарами и показатели оперативного реагирования подразделений пожарной охраны получены из электронной базы данных пожаров, которая ведется с использованием автоматизированной аналитической системы поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России[2].

Сведения о плотности населения и площади лесов в субъектах Российской Федерации взяты из данных Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации[3]. Характеристики климата субъектов Российской Федерации получены на справочно-информационном портале «Погода и климат»[4]. При определении сейсмической опасности в субъектах Российской Федерации использованы данные СП 14.13330.2014[5].

---

[1] *Об утверждении методик расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны*. Приказ МЧС России от 15.10.2021 № 700. URL: https://base.garant.ru/403136953/ (дата обращения: 18.12.2023)

[2] *Об утверждении Регламента работы в информационной системе «Автоматизированная аналитическая система поддержки и управления контрольно-надзорными органами МЧС России»*. Приказ МЧС России № 954 от 04.10.2022. URL: https://fireman.club/normative-documents/prikaz-mchs-rossii-954-ot-04-10-2022-ob-utverzhdenii-reglamenta-raboty-v-informaczionnoj-sisteme/ (дата обращения: 11.12.2023)

[3] *Регионы России. Социально-экономические показатели 2022*. Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204 (дата обращения: 08.12.2023)

[4] Справочно-информационный портал «Погода и климат». URL: http://www.pogodaiklimat.ru/ (дата обращения: 08.12.2023)

[5] *Свод правил. Строительство в сейсмических районах.* СП 14.13330.2018 от 25.11.2023. URL: https://docs.cntd.ru/document/550565571 (дата обращения: 08.12.2023)

Отобранные статистические показатели характеризовались большим разбросом, что было обусловлено различными размерами субъектов Российской Федерации (площадь территорий и численность населения), а также различиями их природно-климатических и географических условий. В связи с этим для приведения статистических данных к единообразной форме была проведена нормировка ряда показателей, что позволило преобразовать множество натуральных показателей в синтетические. Нормировка показателей осуществлялась на площадь территории субъектов (плотность населения, доля лесов и водной поверхности от площади территории субъекта) и на численность населения (количество пожаров, число погибших и травмированных при пожарах).

Дальнейшее моделирование проводилось с использованием полученной матрицы синтетических показателей. Значимые факторы выделялись с использованием трех наиболее распространенных методов: центроидного, главных компонент и максимального правдоподобия. Все три метода дают близкие результаты, которые в пределах статистических погрешностей согласуются между собой. В дальнейшем для проведения факторного анализа был использован метод главных компонент.

На втором этапе с помощью метода главных компонент были получены значимые факторы. Для облегчения их интерпретации выполнено вращение полученных факторов с использованием следующих методов:

– варимакс (данный метод путем уменьшения числа переменных для каждого фактора позволяет выполнить лучшее разделение факторов);

– квартимакс (данный метод путем уменьшения числа факторов, относящихся к каждой переменной, дает возможность выделить генеральный фактор и упростить интерпретацию);

– биквартимакс;

– эквимакс.

Перед проведением процедуры вращения факторные нагрузки были нормализованы с использованием метода Кайзера. Это позволило исключить влияние переменных с большой схожестью на итоговый результат. В последующих исследованиях использовался метод вращения варимакс, поскольку анализ полученных результатов показал, что факторные нагрузки несущественно зависят от метода вращения.

В результате факторного анализа было получено пять значимых факторов. Доля общей дисперсии, объясняемой данными факторами, распределена следующим образом: первый фактор — 22,1 %, второй фактор — 15,4 %, третий — 12,1 %, четвертый — 9,7 %, пятый фактор — 7,7 %. Данные пять значимых факторов объясняют 67,0 % общей дисперсии.

В таблице 1 представлены значения факторных нагрузок для каждого из пяти факторов (значимые показатели выделены полужирным шрифтом).

Таблица 1

Матрица факторных нагрузок

Переменная (показатель)	Фактор				
	1	2	3	4	5
Y_1	0,019	-0,179	**0,681**	0,212	-0,308
Y_2	**0,692**	0,028	-0,241	0,027	0,123
Y_3	**0,692**	0,164	**0,484**	-0,123	0,021
Y_4	**0,821**	-0,095	0,229	0,046	-0,121
Z_1	-0,362	**0,587**	**0,417**	0,091	0,306
Z_2	0,009	0,218	**0,509**	-0,343	0,265
X_1	-0,093	0,069	**-0,587**	-0,086	-0,063
X_2	0,018	0,234	0,056	0,070	**-0,836**
X_3	0,000	-0,373	-0,155	-0,422	**-0,532**
X_4	0,236	-0,305	**0,536**	-0,357	0,002
X_5	-0,334	0,026	0,008	**-0,758**	0,016
X_6	**-0,636**	0,032	-0,062	**0,630**	0,200
X_7	**-0,646**	0,357	-0,343	-0,144	0,040
X_8	-0,073	**-0,833**	0,097	0,174	0,133
X_9	0,058	**-0,841**	0,180	-0,019	0,051
X_{10}	**-0,437**	-0,322	0,191	**0,630**	-0,081

На третьем этапе была решена творческая задача, которая выходит за пределы формального метода — проведена содержательная интерпретация полученных факторов с использованием предметных терминов.

Результаты исследования. Установлено, что в первый значимый фактор наибольший вклад вносят следующие переменные:

– средний прямой материальный ущерб от одного пожара, руб. (Y_2);

– количество погибших при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, чел. (Y_3);

– количество травмированных, приходящихся на 100 тыс. человек населения, чел. (Y_4);

– средняя температура июля, °С (X_6);

– средняя температура января, °С (X_7);

– количество солнечных дней в году (X_{10}).

Среди показателей обстановки с пожарами в первый фактор наибольший вклад вносит показатель «количество травмированных при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения». Данный фактор характеризует связь климатических условий с показателями обстановки с пожарами. В тех субъектах Российской Федерации, где более суровые климатические условия (низкие температуры, малое количество солнечных дней), отмечаются более тяжелые последствия пожаров (больше погибших и травмированных, выше материальный ущерб).

Данная взаимосвязь демонстрируется на рис. 1 и 2, где показаны зависимости количества пострадавших (погибших и травмированных) при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, от средней температуры января. Видно, что с уменьшением средней температуры увеличивается количество пострадавших при пожарах.

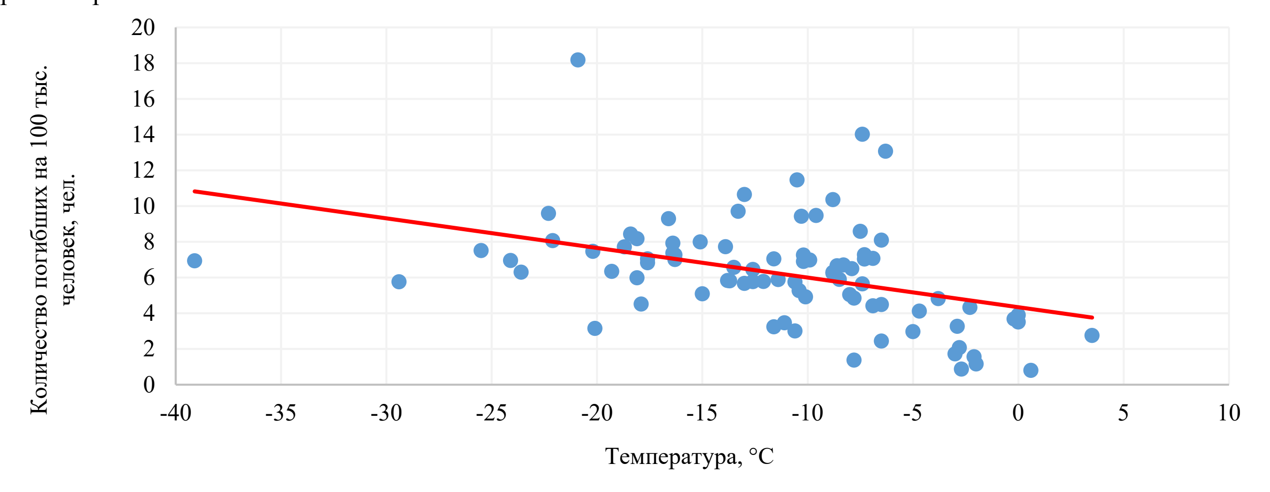


Рис. 1. Зависимость количества погибших при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, от средней температуры января в субъектах Российской Федерации.
Прямая — результат аппроксимации линейной функцией y = -0,166x + 4,338

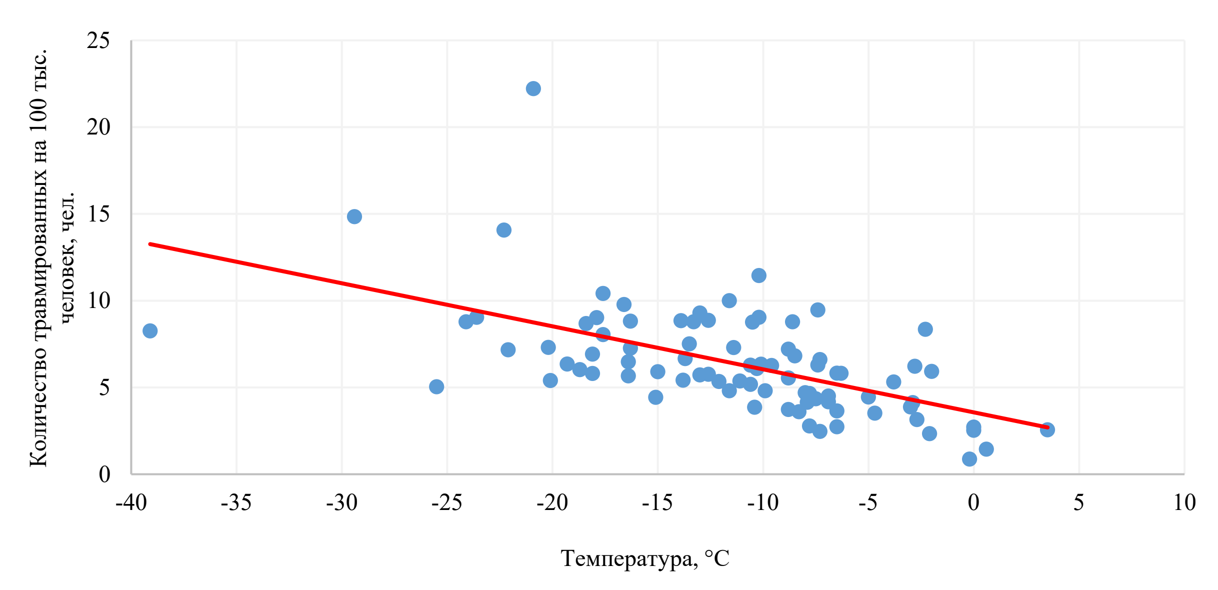


Рис. 2. Зависимость количества травмированных при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, от средней температуры января в субъектах Российской Федерации. Прямая — результат аппроксимации линейной функцией y = -0,248x + 3,565

Для второго значимого фактора наиболее существенными являются следующие переменные:

– среднее время, за которое прибывает первое подразделение пожарной охраны, мин. (Z_1);

– сейсмическая опасность (наличие населенных пунктов с указанной сейсмической интенсивностью для степени сейсмической опасности С) (X_8);

– доля территории, занятой горами, от общей площади территории субъекта, % (X_9).

Второй фактор характеризует взаимосвязь показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны с географическими особенностями субъектов Российской Федерации. Наблюдается важная зависимость — чем большую территорию субъекта занимают горы, тем меньше среднее время, за которое первое подразделение пожарной охраны прибывает к месту вызова.

Распределение факторных нагрузок для трех групп показателей в плоскости факторов 1 и 2 показано на рис. 3.

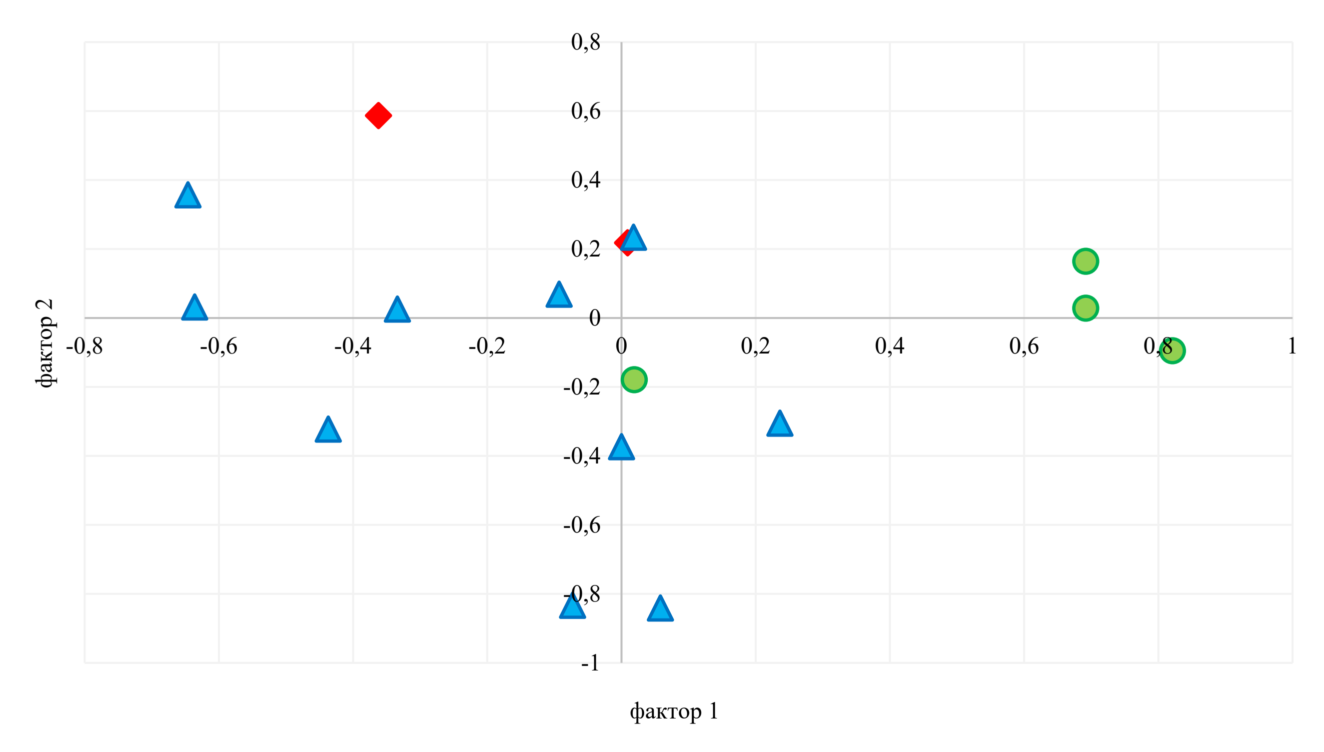


Рис. 3. Значения факторных нагрузок в плоскости факторов 1 и 2. Зеленым цветом обозначены показатели первой группы, красным — второй группы, синим — третьей группы

В третий значимый фактор наибольший вклад вносят следующие переменные:

– количество пожаров, приходящихся на 1 тыс. человек населения, ед. (Y_1);

– количество погибших при пожарах, приходящихся на 100 тыс. человек населения, чел. (Y_3);

– среднее время, за которое прибывает первое подразделение пожарной охраны, мин. (Z_1);

– среднее время, затрачиваемое на тушение пожара, мин. (Z_2);

– плотность населения, чел/км^2 (X_1);

– доля лесов от площади территории субъекта, % (X_4).

Третий фактор описывает взаимосвязь показателей обстановки с пожарами и показателей оперативного реагирования с плотностью населения и лесистостью территории. Как показали ранее проведенные исследования, с ростом плотности уменьшается средняя площадь области обслуживания одного подразделения пожарной охраны, результатом чего является снижение времени прибытия первого подразделения пожарной охраны. С другой стороны, чем ниже плотность, тем больше площадь территории, на которой проживает одинаковое количество людей, соответственно, на большей площади происходит большее количество пожаров. Интересно также отметить, что с увеличением плотности населения снижается количество пострадавших при пожарах, приходящихся на 100 тыс. населения.

На обстановку с пожарами также влияет площадь лесов. С увеличение доли территории субъекта Российской Федерации, занятой лесами, увеличивается количество пожаров, приходящихся в расчете на 1 тыс. человек.

Получена зависимость количества пожаров, приходящихся на 1 тыс. человек, от плотности населения. Как видно на рис. 4, количество пожаров уменьшается с ростом плотности населения. Данная зависимость описывается экспоненциальной функцией.

На рис. 5 представлено распределение факторных нагрузок для трех групп показателей в плоскости факторов 1 и 3.

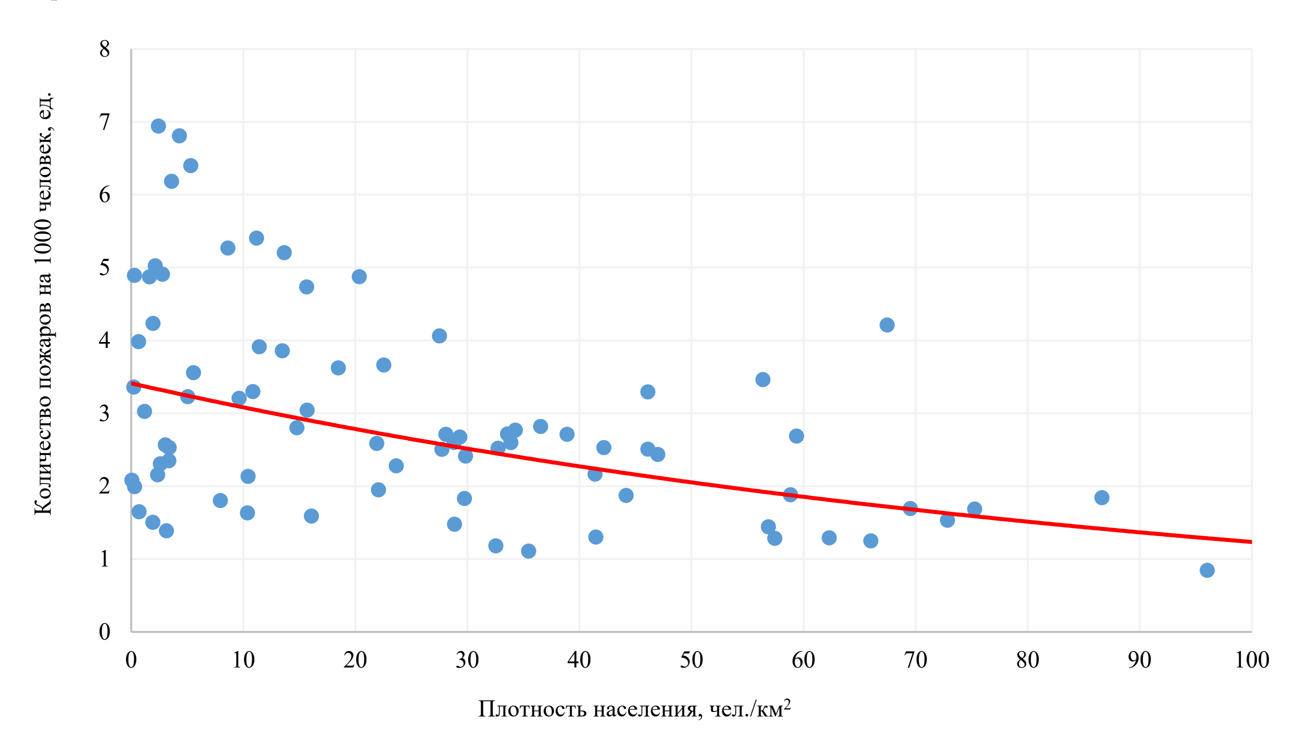


Рис. 4. Зависимость количества пожаров, приходящихся на 1 тыс. человек, от плотности населения. Кривая — результат аппроксимации экспоненциальной функцией $y = 3{,}412e^{-0{,}0102x}$

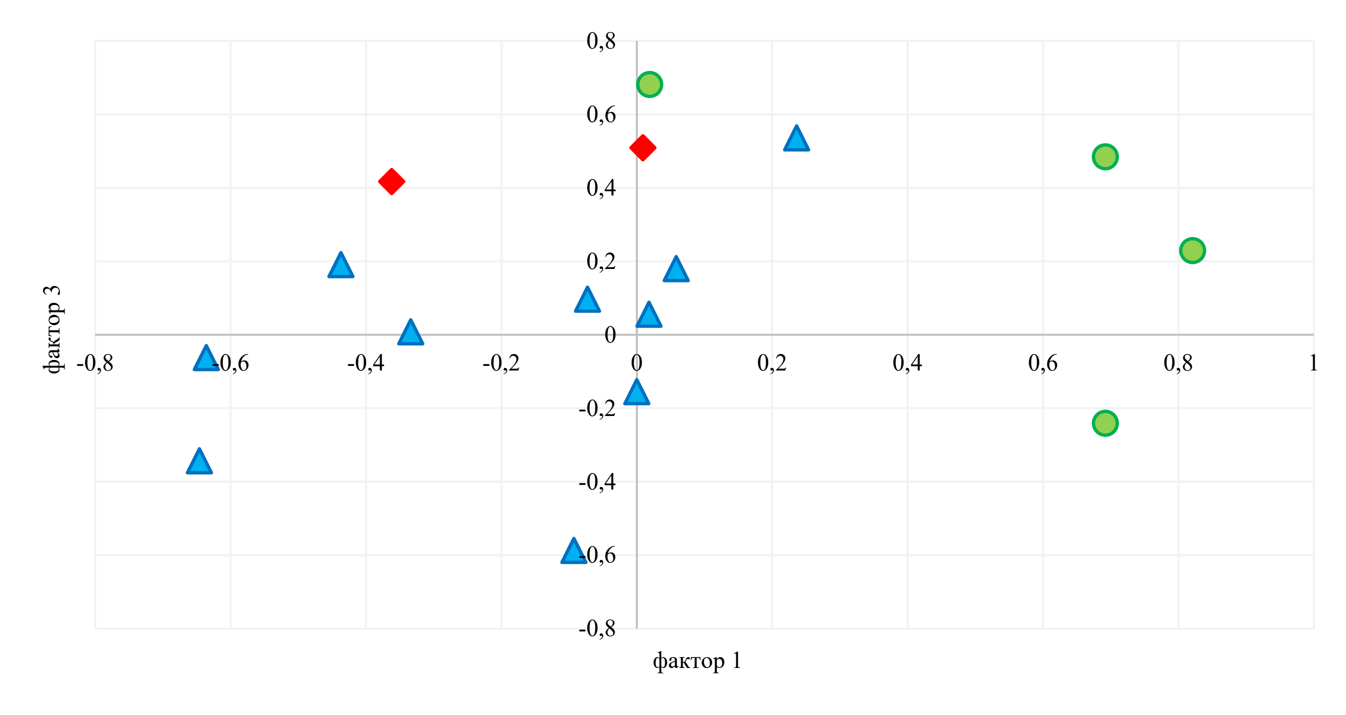


Рис. 5. Значения факторных нагрузок в плоскости факторов 1 и 3. Зеленым цветом отмечены показатели первой группы, красным — второй группы, синим — третьей группы

Для четвертого значимого фактора наиболее важным являются следующие переменные:

– среднегодовое количество осадков, мм в год (X_5);

– средняя температура июля, С° (X_6);

– количество солнечных дней в году (X_{10}).

Данный фактор связан с климатическими характеристиками субъектов Российской Федерации. Показатели первой и второй групп значительного вклада в данных фактор не вносят. Следует отметить, что взаимосвязь климатических характеристик субъектов с показателями обстановки с пожарами хорошо прослеживается из анализа факторных нагрузок для первого фактора (см. выше).

Для пятого значимого фактора определяющими являются следующие переменные:

– доля площади водной поверхности от площади территории субъекта, % (X_2);

– длина морской береговой линии от общей протяженности границы субъекта, % (X_3).

Данные гидрографические характеристики не оказывают существенного влияния на обстановку с пожарами и на показатели оперативного реагирования подразделений пожарной охраны в субъектах Российской Федерации.

Обсуждения и заключение. Впервые с использованием факторного анализа проведено исследование влияния природно-климатических и географических особенностей субъектов Российской Федерации на уровень пожарной безопасности. Проведенный анализ показал, что наиболее существенно на обстановку с пожарами и деятельность пожарной охраны в субъектах Российской Федерации влияют следующие природно-климатические, географические и демографические показатели: средняя температура, лесистость территории, наличие горных массивов, плотность населения. Таким образом, при определении численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны необходимо учитывать данные особенности субъектов Российской Федерации.

Список литературы

1. Bogachkova L.Yu., Baybakova K.A. Application of the index method of factor analysis to studying the rates of territorial energy intensity increase (the case of macro-regions of the Russian Federation). *Modern Economics: Problems and Solutions.* 2020;(12(132)):163–173. https://doi.org/10.17308/meps.2020.12/2501

2. Устинова Л.Н., Сиразетдинов Р.М., Сиразетдинова Э.Р. Факторный анализ индикаторов инновационного развития государства. *Вопросы инновационной экономики*. 2020;10(4):1849–1864. https://doi.org/10.18334/vinec.10.4.111140

3. Большаков М.А. Применение факторного анализа для снижения размерности исходных данных мониторинга ИТ-инфраструктуры. *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2022;4(32):17–23. https://doi.org/10.24412/2413-2527-2022-432-17-23

4. Chepeleva T.I., Chepelev A.N. Statistical analysis of industrial processes. *Science and Technique*. 2022;21(2):158–163. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-158-163

5. Гимишян М.К., Олексин С.Л. Использование факторного анализа в обеспечении качества обслуживания пользователей воздушного пространства. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации.* 2022;1(34):79–84.

6. Йереског К.Г., Клован Д.И., Реймент Р.А. *Геологический факторный анализ*. Москва: Недра; 2017. 224 с.

7. Харин В.В., Кондашов А.А., Удавцова Е.Ю., Бобринев Е.В. Исследование показателей оперативного реагирования и тушения пожаров подразделений пожарной охраны с помощью факторного анализа. *Вестник НЦ БЖД*. 2020;3(45):132–141. URL: https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2478119.pdf?ysclid=lqait2uh3c712768889 (дата обращения: 10.10.2023).

8. Харин В.В., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Кондашов А.А. Исследования социальных рисков последствий пожаров с использованием факторного анализа. *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2019;4(15):76–81.

9. Харин В.В., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Удавцова Е.Ю. Результаты применения факторного моделирования формирования обстановки с пожарами в сельских поселениях субъектов Российской Федерации. *Вестник НЦ БЖД*. 2018;3(37):118–127. URL: https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_1591727.pdf?-ysclid=lqaj4lxyfm433490358 (дата обращения: 10.10.2023).

10. Харин В.В., Кондашов А.А., Удавцова Е.Ю., Бобринев Е.В. Применение факторного анализа для оценки готовности подразделений пожарной охраны. *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. 2020;2(6):443–448.

References

1. Bogachkova LYu, Baybakova KA. Application of the index method of factor analysis to studying the rates of territorial energy intensity increase (the case of macro-regions of the Russian Federation). *Modern Economics: Problems and Solutions.* 2020;(12(132)):163–173. https://doi.org/10.17308/meps.2020.12/2501

2. Ustinova LN, Sirazetdinov RM, Sirazetdinova ER. Factor analysis of the state's innovative development indicators. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki*. 2020;10(4):1849–1864. https://doi.org/10.18334/vinec.10.4.111140 (In Russ.).

3. Bolshakov MA. Analysis to reduce the dimensionality of initial IT infrastructure monitoring data. *Intellectual Technologies on Transport*. 2022;4(32):17–23. https://doi.org/10.24412/2413-2527-2022-432-17-23 (In Russ.).

4. Chepeleva T.I., Chepelev A.N. Statistical analysis of industrial processes. *Science and Technique*. 2022;21(2):158–163. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-158-163

5. Gimishyan MK, Oleksin SL. The use of factor analysis in ensuring the quality of service for users of air spread. V*estnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoi aviatsii.* 2022;1(34):79–84. (In Russ.).

6. Iereskog KG, Klovan DI, Reiment RA. *Geologicheskii faktornyi analiz.* Moscow: Nedra; 2017. 224 p. (In Russ.).

7. Kharin VV, Kondashov AA, Udavtsova EYu, Bobrinev EV. Research of indicators of rapid response and fire extinguishing of fire protection units using factor analysis. *Vestnik NTsBZhD.* 2020;3(45):132–141. URL: https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2478119.pdf?ysclid=lqait2uh3c712768889 (accessed: 10.10.2023). (In Russ.).

8. Kharin VV, Bobrinev EV, Udavtsova EYu, Kondashov AA. A sociological study of the impact of the fires with the use of factor analysis. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2019;4(15):76–81. (In Russ.).

9. Kharin VV, Bobrinev EV, Kondashov AA, Udavtsova EYu. The results of factor modeling of the formation of the situation with fires in rural settlements of the subjects Russian Federation. *Vestnik NTsBZhD.* 2018;3(37):118–127. URL: https://ncbgd.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_1591727.pdf?ysclid=lqaj4lxyfm433490358 (accessed: 10.10.2023). (In Russ.).

10. Kharin VV, Kondashov AA, Udavtsova EYu, Bobrinev EV. Primenenie faktornogo analiza dlya otsenki gotovnosti podrazdelenii pozharnoi okhrany. *Fire and technospheric safety: problems and ways of improvement*. 2020;2(6):443–448. (In Russ.).

Поступила в редакцию 26.11.2023
Поступила после рецензирования 11.12.2023
Принята к публикации 18.12.2023

Об авторах:

Олег Васильевич Стрельцов, заместитель начальника отдела — начальник сектора Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 3260-7621, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Евгений Васильевич Бобринев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 7690-7389, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Елена Юрьевна Удавцова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), ScopusID, SPIN-код: 1125-8841, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Андрей Александрович Кондашов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), ScopusID, SPIN-код: 2248-9764, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Светлана Игоревна Рюмина, научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 2523-5991, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:
О.В. Стрельцов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования.
Е.В. Бобринев — сбор статистических данных, выводы по результатам расчетов.
Е.Ю. Удавцова — подготовка рисунков, редактирование окончательного варианта статьи.
А.А. Кондашов — анализ статистических данных, написание первого варианта статьи.
С.И. Рюмина — формирование списка литературы, редактирование окончательного варианта статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 26.11.2023
Revised 11.12.2023
Accepted 18.12.2023

About the Authors:

Oleg V. Streltsov, Deputy Head of the Department — Head of the Sector of the Research Institute of Fire Protection of All-Russian Order "Badge of Honor" of the EMERCOM of Russia (12, Balashikha mcr. VNIIPO, 143903, RF), SPIN-code: 3260-7621, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Evgenii V. Bobrinev, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Leading Researcher of the Research Institute of Fire Protection of All-Russian Order "Badge of Honor" of the EMERCOM of Russia (12, Balashikha mcr. VNIIPO, 143903, RF), ScopusID, SPIN-code: 7690-7389, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Elena Yu. Udavtsova, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Research Institute of Fire Protection of All-Russian Order "Badge of Honor" of the EMERCOM of Russia (12, Balashikha mcr. VNIIPO, 143903, RF), ScopusID, SPIN-code: 1125-8841, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Andrei A. Kondashov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Research Institute of Fire Protection of All-Russian Order "Badge of Honor" of the EMERCOM of Russia (12, Balashikha mcr. VNIIPO, 143903, RF), ScopusID, SPIN-code: 2248-9764, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Svetlana I. Ryumina, Researcher of the Research Institute of Fire Protection of All-Russian Order "Badge of Honor" of the EMERCOM of Russia (12, Balashikha mcr. VNIIPO, 143903, RF), SPIN-code: 2523-5991, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Claimed contributorship:
OV Streltsov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study.
EV Bobrinev: collection of statistical data, conclusions based on the results of calculations.
EYu Udavtsova: preparation of figures, editing of the final version of the article.
AA Kondashov: analysis of statistical data, writing the first version of the article.
SI Ryumin: formation of the list of references, editing of the final version of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 331.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-30-40

Научная статья


EDN: WBSVBI

Определение сходимости внутрилабораторных результатов измерений запыленности строительной площадки


Е.А. Король [1], **Е.Н. Дегаев** [1], **С.Л. Пушенко** [2]

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ degaev@inbox.ru

Аннотация

Введение. Внутрилабораторные сличительные испытания являются важным и актуальным мероприятием для обеспечения качества и достоверности результатов исследований в лабораториях. Они позволяют оценить точность и воспроизводимость применяемых в лаборатории методов, а также выявить возможные источники ошибок и несоответствий в ее работе. Результаты внутрилабораторных сличительных испытаний предоставляются экспертам при подтверждении компетентности в рамках аккредитации. Как правило, сличительные испытания проводят в лабораторных условиях в привычной и спокойной для испытателей обстановке. Однако лаборатории, проводящие исследования в рамках специальной оценки условий труда (СОУТ), вынуждены проводить выездные сличительные испытания на реальных объектах, где за испытаниями наблюдают заказчики, которые невольно отвлекают работников лаборатории, что напрямую влияет на качество измерений. Целью данной работы является оценка качества проведения выездных внутрилабораторных сличительных испытаний на примере определения запыленности рабочего места каменщика на строительной площадке и определение минимально необходимого и достаточного для этого количества измерений.

Материалы и методы. Для определения запыленности рабочего места каменщика использовался весовой метод, который заключается в сборе пыли на фильтры с последующим взвешиванием и определением концентрации. Оценка качества проведения внутрилабораторных испытаний производилась согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения».

Результаты исследования. На рабочем месте каменщика выявлено превышение разовой предельно допустимой концентрации пыли в 1,6 раза. Средняя концентрация пыли на исследуемом рабочем месте составила: $К_{п2}$ = 9,57±0,81 мг/м^3, сходимость полученных результатов, r = 8,68 %, относительная погрешность, δ = 8,50 %. Выявлено, что максимально допустимая разница результатов двух испытаний составляет 0,84 мг/м^3. Разница прямых измерений массы двух образцов должна быть не более 0,1 мг.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показали возможность проведения минимального количества измерений, что по условиям воспроизводимости испытания признаются удовлетворительными и могут предоставляться экспертам для подтверждения компетентности лаборатории. В рамках СОУТ работникам исследуемого объекта рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания, предохраняющие от высокодисперсной пыли.

Ключевые слова: сходимость, внутрилабораторный контроль, запыленность, строительная площадка, рабочее место, специальная оценка условий труда (СОУТ)

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Король Е.А., Дегаев Е.Н., Пушенко С.Л. Определение сходимости внутрилабораторных результатов измерений запыленности строительной площадки. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):30–40. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-30-40

Original article

Determination of the Convergence of Intra-Laboratory Measurements of Dust Content on a Construction Site

Elena A. Korol [1], **Evgeniy N. Degaev** [1], **Sergey L. Pushenko** [2]
[1] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
degaev@inbox.ru

Abstract
Introduction. Intra-laboratory comparison tests play an important role in ensuring the quality and reliability of research outcomes in laboratories. These tests allow researchers to evaluate the accuracy and reproducibility of the methods they use in their work, as well as to identify potential sources of error and inconsistency. The results of these tests are shared with experts to confirm competence within the accreditation. Typically, comparison tests are carried out in laboratory conditions in a familiar and calm environment for the testers. However, when laboratories conduct research as part of a special assessment of working conditions (SAWC) they are required to conduct on-site comparisons at real-world facilities, where customers may unwittingly disrupt the process and directly affecting the quality of the measurements. The aim of this study is to evaluate the quality of on-site intra-laboratory comparison tests using the example of determining the dust content in a bricklayer's work environment on a construction site, and to determine the minimum number of measurements necessary and sufficient for this purpose.
Materials and Methods. To determine the dustiness of the bricklayer's workplace, a weighing method was used. This involved collecting dust on filters and then weighing them to determine the concentration. The quality assessment of intra-laboratory tests was conducted in accordance with GOST R ISO 5725-1-2002 "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions".
Results. At the bricklayer's workplace, a 1.6-fold excess of the one-time maximum permissible dust concentration was detected. The average dust concentration at the workplace under study was: K_{p2} = 9.57 ± 0.81 mg/m^3, the convergence of the results obtained was r = 8.68 %, the relative error δ = 8.50 %. It was revealed that the maximum allowable difference between the results of the two tests was 0.84 mg/m^3. The difference in direct measurements of the mass of the two samples should be no more than 0.1 mg.
Discussion and Conclusion. The results obtained demonstrated the possibility of conducting a minimum number of measurements that, under reproducible conditions, are considered satisfactory and could be provided to experts for confirming the competence of the laboratory. As part of a special assessment of working conditions, employees of the object under study are recommended to use personal respiratory protection equipment that offers protection against highly dispersed dust particles.

Keywords: convergence, intra-laboratory control, dust content, construction site, workplace, special assessment of working conditions (SAWC)

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Korol EA, Degaev EN, Pushenko SL. Determination of the Convergence of Intra-Laboratory Measurements of Dust Content on a Construction Site. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):30–40. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-30-40

Введение. Измерения на запыленность рабочих мест проводятся в рамках специальной оценки условий труда (СОУТ) на строительной площадке с целью выявления и оценки вредных и опасных производственных факторов, а также разработки мероприятий по их устранению или минимизации [1]. Результаты специальной оценки условий труда являются основой для разработки и внедрения соответствующих мер по улучшению условий труда [2]. Это может быть изменение рабочих процессов, применение новых технологий, обновление оборудования или улучшение санитарных условий [3]. Важно, чтобы эти меры были реализованы с учетом мнения сотрудников и их потребностей [4].

Проведение специальной оценки условий труда на строительной площадке имеет свои особенности, связанные с характером и условиями труда [5]. К таким особенностям можно отнести:

– работу на открытом воздухе, что может привести к воздействию неблагоприятных погодных условий;

– использование строительной техники и оборудования, которые могут создавать шум, вибрацию, пыль и другие загрязнения;

– выполнение работ на высоте, что требует специального обучения и аттестации персонала;

– работа с различными материалами и веществами, которые могут быть опасными для здоровья работников;

– необходимость соблюдения требований охраны труда и техники безопасности, включая использование средств индивидуальной защиты.

В результате выполнения СОУТ устанавливаются классы условий труда для каждой профессии, рекомендуются мероприятия по минимизации выявленных рисков и последствий влияния вредных факторов [6]. По данным СОУТ руководство организации разрабатывает мероприятия по улучшению условий и охраны труда, также определяются размеры дополнительных выплат для работников, занятых на производстве с неблагоприятными или рискованными условиями [7]. При инструментальном исследовании рабочих мест осуществляются замеры и анализ шума, степени запыленности, естественной и искусственной освещенности, температуры, влажности и пр. [8].

СОУТ имеют право проводить организации, обладающие соответствующей аккредитацией и опытом работы в данной области. Ими могут быть как специализированные организации, так и лаборатории, занимающиеся исследованием условий труда.

В соответствии с Федеральным законом от 28.12.2013 № 426 «О специальной оценке условий труда» организация, занимающаяся СОУТ, должна:

– иметь не менее 5 штатных сотрудников с действующим аттестатом на право проведения СОУТ;

– быть зарегистрированной в реестре организаций, проводящих СОУТ, который ведет Минтруда и соцзащиты РФ;

– обладать системой менеджмента качества (СМК), соответствующей ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» и ГОСТ Р 54934-2012/ OHSAS 18001:2007 «Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования»;

– располагать аккредитованной испытательной лабораторией, которая выполняет исследования и измерения опасных и вредных факторов.

Испытательная лаборатория (ИЛ) должна иметь действующий аттестат аккредитации, соответствующую область аккредитации, отражающую возможность исследования вредных и опасных факторов производства и условий труда, а также аттестованное испытательное оборудование (ИО) и поверенные средства измерений (СИ) [9]. Согласно постановлению Правительства РФ от 26 ноября 2021 года № 2050 «Об утверждении правил осуществления аккредитации в национальной системе аккредитации…» аккредитованные лаборатории в рамках подтверждения компетентности должны проводить сравнительные испытания для определения сходимости результатов измерений. Сходимость результатов измерений при проведении специальной оценки условий труда является одним из ключевых показателей, определяющих качество проводимых измерений.

Проведенные ранее исследования в данной области затрагивали в основном межлабораторные сравнительные испытания (МСИ) и не рассматривали внутрилабораторные сравнительные (сличительные) испытания. Так, в работе Козлова А.В. приведены результаты МСИ геосинтетического материала [10]. Автор указывает на целесообразность нормирования требований показателей прецизионности испытаний. В исследовании Лекомцевой М.М. и Шендалевой Е.В. проведен анализ результатов МСИ нефтепродуктов, по результатам которого рекомендуется преобразовывать данные в линейную зависимость для получения неизменного значения стандартного отклонения [11]. В работе Ясина Дургута отмечается, что межлабораторные сравнительные испытания, проводимые в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий», выполняются более эффективно, по сравнению со сравнительными измерениями, организованными в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17043 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации» [12].

Между тем, согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» весьма важны еще и результаты внутрилабораторных сравнительных испытаний, так как они используются для проведения корректирующих мероприятий, улучшения качества работы лаборатории и повышения точности результатов [13]. Поэтому целью данной работы является оценка качества проведения выездных внутрилабораторных сличительных испытаний. Такая оценка представлена на примере определения запыленности рабочего места каменщика на строительной площадке. Лаборатории,

осуществляющие свою деятельность в рамках СОУТ, вынуждены проводить внутрилабораторные сравнительные испытания на выездной основе, и условия их значительно отличаются от лабораторных. Сотрудники лаборатории ограничены временем допуска на объект, поэтому им важно выполнить исследования не только качественно, но и с минимально количеством испытаний. В связи с этим задача авторов статьи — определить это минимально необходимое и достаточное количество таких испытаний.

Методы исследований. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны, а также методы контроля показателей микроклимата и содержания вредных веществ в воздухе регламентирует ГОСТ 12.1.005-88 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». Для определения запыленности использовался весовой метод[1], который заключается в сборе пыли на фильтры с последующим взвешиванием и определением концентрации.

Массовую концентрацию $К_п$ пыли определяют по формуле:

$$К_П = \frac{(m_n - m_0) \cdot 1000}{V_{20}}, \quad (1)$$

где $К_п$ — концентрация пыли в воздухе, мг/м^3; m_0 — масса чистого фильтра, мг; m_n — масса фильтра с осевшими частицами пыли, мг; V_{20} — объем воздуха, приведенный к стандартным условиям, дм^3.

$$V_{20} = \frac{V_t \cdot 293 \cdot P}{(273 + T) \cdot 101{,}33}, \quad (2)$$

где V_t — объем воздуха, прошедший через фильтр, дм^3; P — атмосферное давление, кПа; T — температура воздуха на рабочем месте, °C.

Согласно рекомендациям государственной системы обеспечения единства измерений[2] для обработки результатов определения запыленности рабочего места можно использовать метод приведения, который предполагает наличие значений измеряемых аргументов, полученных в результате многократных измерений.

Результат косвенного измерения находят по формуле:

$$\tilde{A} = \sum_{j=1}^{L} \frac{A_j}{L}, \quad (3)$$

где L — число частных значений измеряемой величины; A_j — j-е значение измеряемой величины; j — номер последовательного измерения от 1 до L.

Среднее квадратическое отклонение $S(\tilde{A})$ случайных погрешностей результата косвенного измерения рассчитывают по следующей формуле:

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{L} \frac{(A_j - \tilde{A})^2}{L(L-1)}}. \quad (4)$$

При нормальном распределении отдельных значений измеряемой величины доверительные границы случайных погрешностей определяют по формуле:

$$\Delta = t_p \cdot S(\tilde{A}), \quad (5)$$

где t_p — коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности и числа результатов наблюдений.

Прецизионность оценивается по показателю повторяемости (относительной среднеквадратического отклонения повторяемости), σ_r, и по показателю точности (границ относительной погрешности), δ:

$$\sigma_r = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \tilde{x})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

где x_i — i-й результат испытаний, полученный в условиях повторяемости; $\tilde{x}$ — среднеарифметическое значение из n результатов испытаний в условиях повторяемости (сходимости).

$$\delta = \frac{\Delta}{\tilde{x}} 100\% \le 25\ \%. \quad (7)$$

[1] *Методика измерений массовой концентрации пыли гравиметрическим методом для целей специальной оценки условий труда.* МИ АПФД-18.01.2018. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390372 (дата обращения: 25.11.2023).

[2] *Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. МИ 2083–90.* Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР; 1991. URL:https://znaytovar.ru/gost/2/MI_208390_GSI_Izmereniya_kosve.html (дата обращения: 25.11.2023).

В процентном отношении сходимость определяют в соответствии с выражением:

$$r = \frac{\sigma_r}{\tilde{x}} 100\ \%. \qquad (8)$$

Для оценки сходимости результатов двух измерений необходимо использовать формулу:

$$r_2 = \frac{|x_1 - x_2|}{\tilde{x}} 100\ \%, \qquad (9)$$

где x_1, x_2 — результаты двух параллельных измерений.

Результаты измерений, полученные в условиях сходимости, признаются удовлетворительными, если полученная сходимость r будет меньше или равна нормативной сходимости $r_{\text{норм}}$:

$$r \le r_{\text{норм}} = 15\ \%. \qquad (10)$$

За результат принимается выражение (8):

$$x = \tilde{x} \pm \Delta\ . \qquad (11)$$

Минимальное количество наблюдений зависит от коэффициента вариации, т. е. отношения среднеквадратического отклонения к среднему значению, и выбирается предварительно из опытных данных. Ошибку в определении среднего значения (статистическая погрешность измерений) необходимо искать в предположении, что закон распределения генеральной совокупности измерений — нормальный. Зная ошибку и доверительную вероятность, можно однозначно установить доверительный интервал для среднего значения и оценить максимальную статистическую погрешность измерений как отношение половины разности границ ошибки среднего значения к среднему значению из опытных данных [14].

Результаты исследований. Проведены измерения на определение запыленности строительной площадки при строительстве многоквартирного жилого дома. Отбор проб производился на рабочем месте каменщика в зоне кладочной стены фильтрами типа АФА (аналитические аэрозольные фильтры) с помощью двух аспираторов ПУ-4Э, обеспечивающих отбор проб с заданным объемным расходом через поглотитель по четырем параллельным каналам. Для установления статистической погрешности измерений инструментами и сотрудниками лаборатории при заданной доверительной вероятности P = 0,95 выполнено восемь параллельных измерений, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты восьми параллельных испытаний

№ измерения	Масса фильтра, m_0, мг	Масса фильтра, m_n, мг	Расход воздуха, л/мин	Атмосферное давление, кПа	Время измерения, мин.	Температура воздуха в рабочей зоне, °С	Частные значения концентрации пыли, мг/м^3	Среднее значение концентрации пыли, мг/м^3	Среднее квадратическое отклонение, мг/м^3	Относительная погрешность, δ, %	Сходимость результатов, r, %
n=8											
№1	30965,6	30966,5	2	102,2	60	21,1	7,46	9,33	1,39	10,29	14,85
№2	31346,8	31347,8	2	102,2	60	21,1	8,29				
№3	33980,5	33981,6	2	102,2	60	21,1	9,12				
№4	35572,3	35573,6	2	102,2	60	21,1	10,78				
№5	34926,9	34928,3	2	102,2	60	21,1	11,61				
№6	30477,7	30479,0	2	102,2	60	21,1	10,78				
№7	32678,4	32679,5	2	102,2	60	21,1	9,12				
№8	32678,4	32679,6	2	102,2	60	21,1	9,95				

Чтобы проверить, подчиняются ли данные нормальному закону распределения, построена гистограмма частот как один из способов визуального представления распределения данных (рис. 1). Гистограмма имеет форму колокола и близка к кривой нормального распределения (рис. 2).

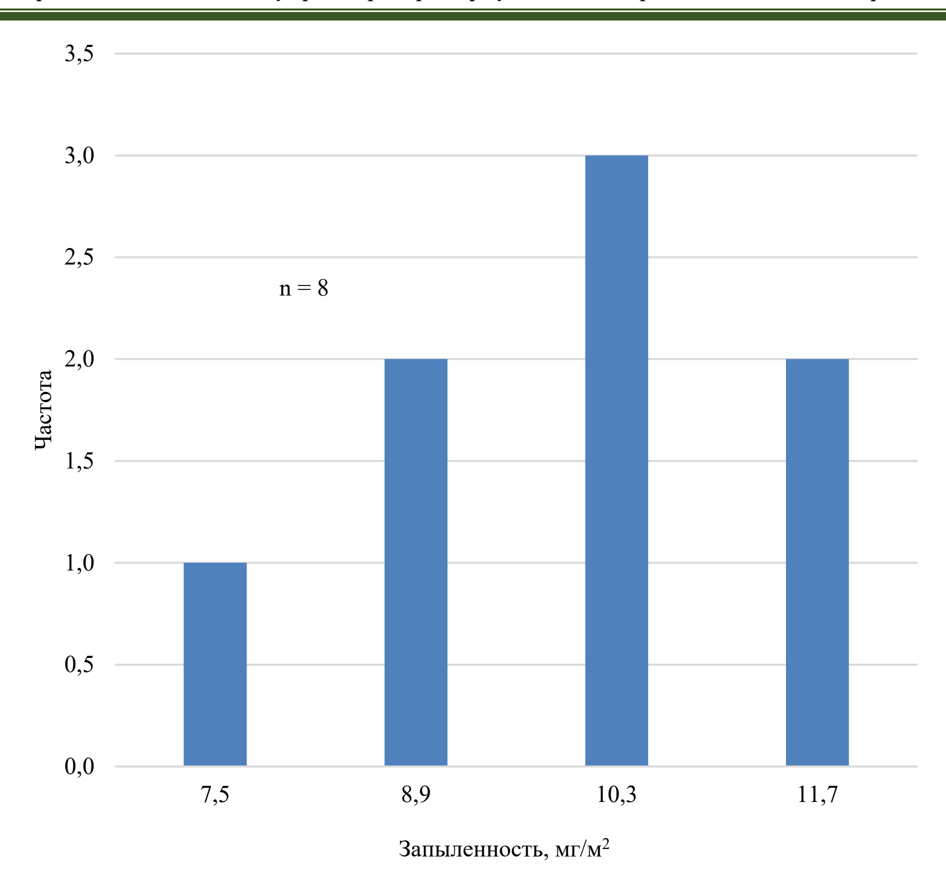


Рис. 1. Гистограмма частот при $n = 8$

Рассчитаны и на графике функции плотности нормального распределения приведены среднее значение и доверительный интервал проведенных измерений (рис. 2).

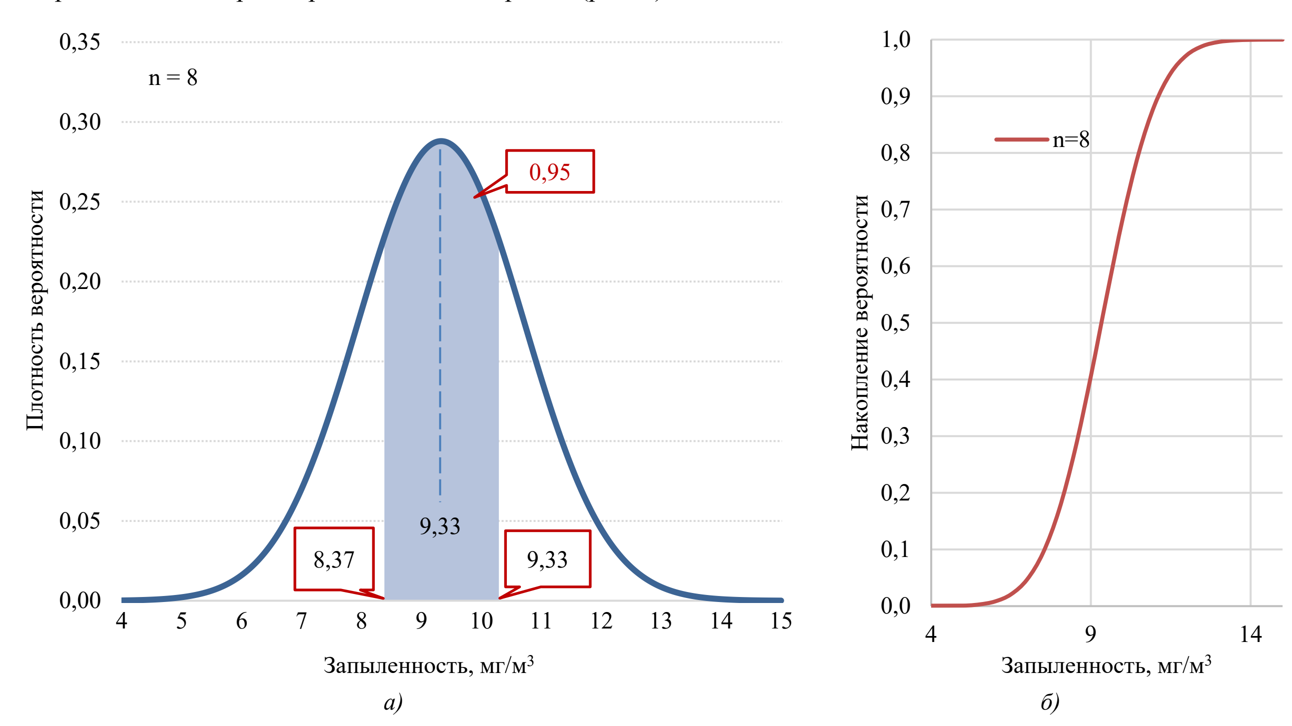


Рис. 2. Графики нормального распределения при $n = 8$:
а — функция плотности нормального распределения; *б* — интегральная функция распределения

За результат принимается среднее значение с указанием доверительного интервала:

$$К_{П8} = 9{,}33 \pm 0{,}96 \text{ мг/м}^3.$$

Для определения минимального количества измерений найдены коэффициент вариации, средняя ошибка выборки и предельная ошибка выборки (рис. 3). Максимальная статистическая погрешность составила 0,26 мг/м^3.

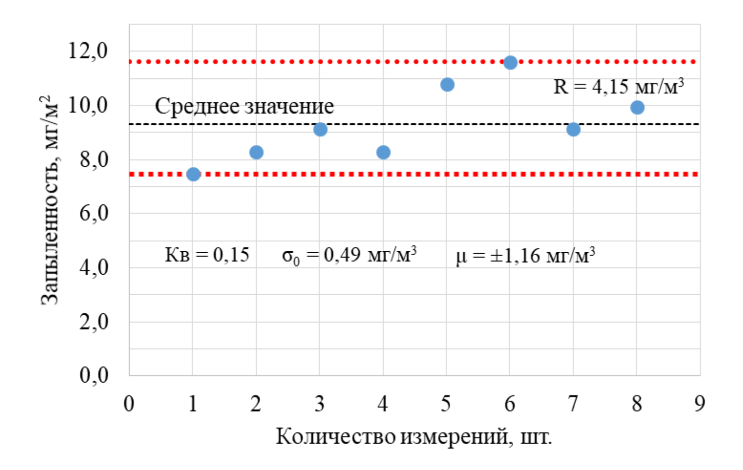


Рис. 3. Размах результатов измерений

Минимальное количество измерений определяется по формуле [11]:

$$n_{min} = \frac{t^2 к_в{}^2}{\delta^2}, \quad (12)$$

$$n_{min} = 1,20 \approx 2.$$

Согласно полученному значению минимального количества испытаний проведены два параллельных испытания по определению концентрации пыли на рабочем месте каменщика (таблица 2).

Таблица 2

Результаты двух параллельных испытаний

№ измерения	Масса фильтра, m_0, мг	Масса фильтра, m_n, мг	Расход воздуха, л/мин	Атмосферное давление, кПа	Время измерения, мин.	Температура воздуха в рабочей зоне, °С	Частные значения концентрации пыли, мг/м^3	Среднее значение концентрации пыли, мг/м^3	Среднее квадратическое отклонение, мг/м^3	Относительная погрешность, δ, %	Сходимость результатов, r, %
n=2											
№ 1	34563,8	34565,0	2	102,2	60	22,0	9,98	9,57	0,59	8,50	8,68
№ 2	30654,3	30655,4	2	102,2	60	22,0	9,15				

Доверительный интервал результатов двух определений концентрации пыли при вероятности 0,95 составил 0,81 мг/м^2 (рис. 4).

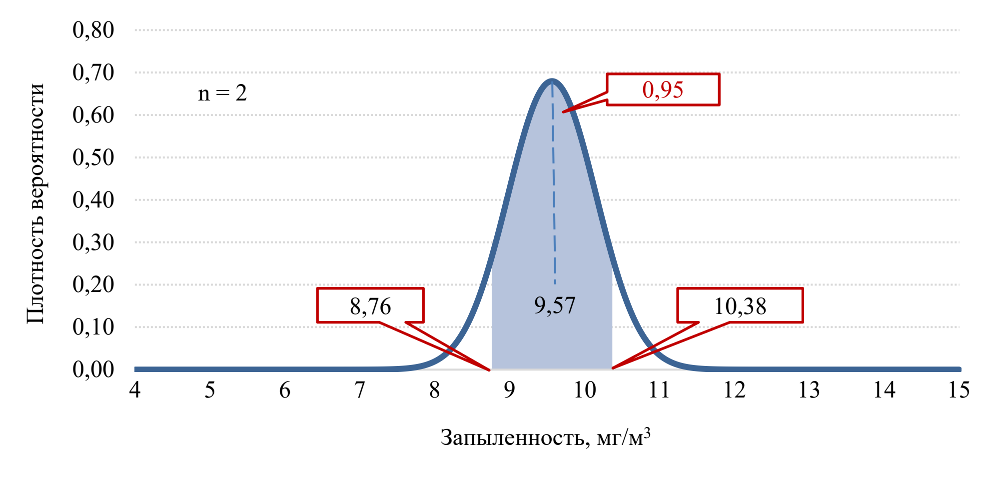


Рис. 4. Функция плотности нормального распределения при n = 2

Согласно условиям сходимости по ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения» и ГОСТ Р 51672-2000 «Метрологическое обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия. Основные положения» результаты параллельных измерений можно признать удовлетворительными, так как выполняются условия (7) и (10) (рис. 5):

$$r_2 = 8.68\,\% < r_{\text{норм}} = 15\,\%,\ \delta_2 = 8{,}50\,\% < \delta_{\text{норм}} = 25\,\%.$$

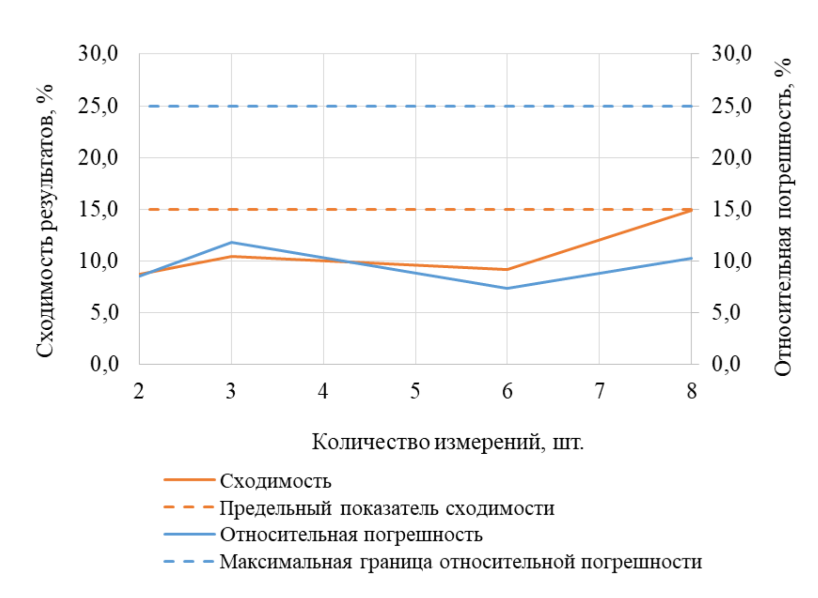


Рис. 5. Зависимость сходимости результатов измерений и относительной погрешности от количества испытаний

По результатам обработки принимается:

$$\text{К}_{\text{П2}} = 9{,}57 \pm 0{,}81\ \text{мг/м}^3.$$

Определение концентрации пыли весовым методом имеет достаточно высокую составляющую погрешностей используемых средств измерений и проводимых операций. Максимально допустимая разница результатов двух измерений составляет 0,84 мг/м^3. Разница прямых измерений массы двух образцов должна быть не более 0,1 мг. При разнице масс в 0,2 мг показатель сходимости результатов двух параллельных измерений становится более 18 % и не удовлетворяет условиям прецизионности. При проведении испытаний на определение запыленности рассмотренной методикой возможно ограничиться двумя параллельными измерениями, при этом погрешность измерений будет равняться инструментальной погрешности.

Строительная пыль относится к малоопасным (IV класс), разовая предельно допустимая концентрация (ПДК) составляет 6 мг/м^3, суточная — 10 мг/м^3. По результатам испытаний выявлено превышение разовой ПДК в 1,6 раза. Для снижения концентрации пыли на рабочем месте каменщика рекомендуются комплексные меры по уменьшению пылеобразования на строительной площадке, т. к. основными источниками пыли являются подъездные дороги, места выгрузки и погрузки строительных материалов, а также технологические процессы, связанные с обработкой и резкой строительных материалов [15]. Необходимо проводить мероприятия, снижающие концентрацию пыли на строительной площадке и за ее пределами [16].

Гигиенический норматив ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» устанавливает разовую ПДК строительной пыли в городском воздухе не более 0,5 мг/м^3.

Обсуждение и заключение. Определение концентрации пыли весовым методом имеет достаточно высокую составляющую погрешностей используемых средств измерений и проводимых операций. Выявлено, что максимально допустимая разница результатов двух проведенных испытаний составила 0,84 мг/м^3. Разница прямых измерений массы двух образцов должна быть не более 0,1 мг.

Обработка результатов испытаний показала возможность проведения двух измерений по определению запыленности рабочего места каменщика на строительной площадке. Сходимость результатов испытаний в рамках подтверждения компетентности лаборатории является важным показателем качества проведенной оценки и свидетельствует о достоверности полученных данных, поэтому в рамках внутрилабораторных сличительных испытаний рекомендуется использовать не менее шести измерений [17]. Чем выше сходимость результатов, тем меньше вероятность ошибок и неточностей в оценке условий труда, что, в свою очередь,

обеспечивает более объективную информацию о состоянии условий труда на рабочих местах и позволяет принять обоснованные меры по их улучшению [18].

Работникам исследованного объекта рекомендовано использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания, защищающие от высокодисперсной пыли. Для снижения концентрации строительной пыли на строительной площадке, а также за её пределами следует проводить орошение строительной площадки водой для осаждения высокодисперсной пыли, поливать подъездные дороги, промывать колеса автотранспортных средств как на въезде на строительную площадку, так и на выезде [19].

Список литературы

1. Кучергин Н.И. СОУТ — специальная оценка условий труда. *Студенческий форум.* 2022;44–1(223):6–7. URL: https://nauchforum.ru/archive/studjournal/44%28223_1%29.pdf (дата обращения: 08.11.2023).

2. Пантелеева О.В., Яковенко О.В. СОУТ как контроль качества безопасности. В: *Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы экологии и промышленной безопасности».* Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; 2023. С. 97–100.

3. Гасилина Т. Новшества в законодательстве по СОУТ. *ТехНадзор.* 2017;1–2(122–123):47–48.

4. Мамытов Е.Г. Нормативно-правовые новации по использованию результатов СОУТ. *Стандарты и качество.* 2015;2:82–83.

5. Пахомова Л.А., Олейник П.П. Выбор и оценка параметров аттестации рабочих мест СОУТ (специальная оценка условий труда). *Строительное производство.* 2019;1:49–52. https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_49

6. Шеметова Е.Г., Богатова А.В., Буракова Н.А. Проведение СОУТ на предприятиях — залог обеспечения безопасности труда. В: *Труды 6-й Международной молодежной научной конференции «Юность и знания — гарантия успеха-2019».* Курск: Юго-Западный государственный университет; 2019. С. 144–147.

7. Пушенко С.Л., Гапонов В.Л., Кукареко В.А. Анализ производственного травматизма в строительной индустрии и пути его снижения. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2022;(2):24–30. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-24-30

8. Бессонов Е.В., Зырянов С.Б., Блинченко А.А. СОУТ как ключевая часть СУОТ. *Молодежь и наука.* 2020;9:48.

9. Ведрова М.А., Бузиков Ш.В. Особенности проведения СОУТ на рабочем месте оператора ПВЭМ. *Актуальные научные исследования в современном мире.* 2021;10–7(78)):88–91.

10. Козлов А.В. Результаты межлабораторных сличительных испытаний геосинтетического материала. Вестник МГСУ. 2023;18(8):1230–1240. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1230-1240

11. Лекомцева М.М., Шендалева Е.В. Статистические методы в сравнительных испытаниях нефтепродуктов. Динамика систем, механизмов и машин. 2016;1:334–340.

12. Durgut Y. Inter-laboratory comparisons and their roles in accreditation. European Journal of Science and Technology. 2021;28:402–406. https://doi.org/10.31590/ejosat.1001957

13. Борисов С.В., Борисов А.В., Стасева Е.В. Анализ условий труда на рабочих местах вагонного ремонтного депо Батайск по материалам СОУТ. В*: Сборник научных трудов конференции «Транспорт: наука, образование, производство».* Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения; 2020. С. 22–25.

14. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей.* Учебник для вузов. 7-е изд., стер. Москва: Высшая школа; 2001. 575 с. URL: https://djvu.online/file/geQAk3qSZR9az (дата обращения: 07.12.2023).

15. Пузырев А.М., Козырева Л.В. Разработка методики оценки профессиональных рисков в строительстве. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2022;1:9−17. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-9-17

16. Herry Supriyatna, Widy Kurniawan, Humiras Hardi Purba. Occupational safety and health risk in building construction projects: A literature review. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2020;3(1):28–40. https://doi.org/10.31181/oresta200134s

17. Jaypee Bathan, Joy C Ashipaoloye. Modeling the mediating effects of occupational safety and health management between organization culture and business performance among employees of construction companies. *International Journal of Open-Access, Interdisciplinary & New Educational Discoveries of ETCOR Educational Research Center (iJOINED ETCOR).* 2023;2(4):131–156. URL: https://www.researchgate.net/publication/375342214 (дата обращения: 08.11.2023).

18. Endah Harisun, Hery Purnomo, Suhartini Suhartini. Occupational safety and health (OSH) in construction projects in ternate city. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology.* 2023;17(1):121–125. https://doi.org/10.47577/technium.v17i.10057

19. Nasana Bajracharya, Pawan Rana Magar, Suman Karki, Suja Giri, Ashish Khanal. Occupational health and safety issues in the construction industry in south asia: a systematic review and recommendations for improvement. *Journal of Multidisciplinary Research Advancements.* 2023;1(1):27–31. https://doi.org/10.3126/jomra.v1i1.55101

References

1. Kuchergin NI. SOUT — spetsial'naya otsenka uslovii truda. *Studencheskii forum.* 2022;44–1(223):6–7. URL: https://nauchforum.ru/archive/studjournal/44%28223_1%29.pdf (accessed: 08.11.2023). (In Russ.).

2. Panteleeva OV, Yakovenko OV. SOUT kak kontrol' kachestva bezopasnosti. In: *Trudy II Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy ekologii i promyshlennoi bezopasnosti".* Novocherkassk: Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); 2023. P. 97–100. (In Russ.).

3. Gasilina T. Novshestva v zakonodatel'stve po SOUT. *TekhNadzor.* 2017;1–2(122–123):47–48. (In Russ.).

4. Mamytov EG. Normativno-pravovye novatsii po ispol'zovaniyu rezul'tatov SOUT. *Standards and Quality.* 2015;2:82–83. (In Russ.).

5. Pakhomova LA, Oleinik PP. Selection and evaluation of work place certification parameters (special assessment of labor conditions). *Construction production.* 2019;1:49–52. https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_49 (In Russ.).

6. Shemetova EG, Bogatova AV, Burako NA. Provedenie SOUT na predpriyatiyakh — zalog obespecheniya bezopasnosti truda. In: *Trudy 6-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Yunost' i znaniya — garantiya uspekha-2019".* Kursk: Southwest State University; 2019. P. 144–147. (In Russ.).

7. Pushenko SL, Gaponov VL, Kukareko VA. Analysis of occupational injuries in the construction industry and ways to reduce it. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2022;(2):24–30. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-24-30 (In Russ.).

8. Bessonov EV, Zyryanov SB, Blinchenko AA. SOUT kak klyuchevaya chast' SUOT. *Youth and science.* 2020;9:48. (In Russ.).

9. Vedrova MA, Buzikov ShV. Features of carrying out the sot at the workplace of the pvem operator. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire.* 2021;10–7(78)):88–91. (In Russ.).

10. Kozlov AV. Results of interlaboratory comparison tests of geosynthetic material. *VESTNIK MGSU.* 2023;18(8):1230–1240. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1230-1240 (In Russ.).

11. Lekomtseva MM, Shendaleva EV. Statisticheskie metody v sravnitel'nykh ispytaniyakh nefteproduktov. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin.* 2016;1:334–340. (In Russ.).

12. Durgut Y. Inter-laboratory comparisons and their roles in accreditation. European Journal of Science and Technology. 2021;28:402–406. https://doi.org/10.31590/ejosat.1001957

13. Borisov SV, Borisov AV, Staseva EV. Analiz uslovii truda na rabochikh mestakh vagonnogo remontnogo depo Bataisk po materialam SOUT. In: *Sbornik nauchnykh trudov konferentsii "Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo".* Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2020. P. 22–25. (In Russ.).

14. Venttsel ES. *Teoriya veroyatnostei.* Textbook of higher education institution. 7-th ed. Moscow: Vysshaya shkola; 2001. 575 p. URL: https://djvu.online/file/geQAk3qSZR9az (accessed: 07.12.2023). (In Russ.).

15. Puzyrev AM, Kozyreva LV. Development of a methodology for assessing professional risks in construction. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2022;1:9−17. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-9-17 (In Russ.).

16. Herry Supriyatna, Widy Kurniawan, Humiras Hardi Purba. Occupational safety and health risk in building construction projects: A literature review. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2020;3(1):28–40. https://doi.org/10.31181/oresta200134s

17. Jaypee Bathan, Joy C Ashipaoloye. Modeling the mediating effects of occupational safety and health management between organization culture and business performance among employees of construction companies. *International Journal of Open-Access, Interdisciplinary & New Educational Discoveries of ETCOR Educational Research Center (iJOINED ETCOR).* 2023;2(4):131–156. URL: https://www.researchgate.net/publication/375342214 (accessed: 08.11.2023).

18. Endah Harisun, Hery Purnomo, Suhartini Suhartini. Occupational safety and health (OSH) in construction projects in ternate city. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology.* 2023;17(1):121–125. https://doi.org/10.47577/technium.v17i.10057

19. Nasana Bajracharya, Pawan Rana Magar, Suman Karki, Suja Giri, Ashish Khanal. Occupational health and safety issues in the construction industry in south asia: a systematic review and recommendations for improvement. *Journal of Multidisciplinary Research Advancements.* 2023;1(1):27–31. https://doi.org/10.3126/jomra.v1i1.55101

Поступила в редакцию 18.12.2023
Поступила после рецензирования 15.01.2024
Принята к публикации 17.01.2024

Об авторах:
Елена Анатольевна Король, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), SPIN-код: 3795-1053, ORCID, KorolEA@mgsu.ru

Евгений Николаевич Дегаев, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), SPIN-код: 1471-9700, ORCID, degaev@inbox.ru

Сергей Леонардович Пушенко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности технологических процессов и производств Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7292-1956, ORCID, slpushenko@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:
Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 18.12.2023
Revised 15.01.2024
Accepted 17.01.2024

About the Authors:
Elena A. Korol, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Housing and Communal Sector Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, RF), SPIN-code: 3795-1053, ORCID, KorolEA@mgsu.ru

Evgeniy N. Degaev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Housing and Communal Sector Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, RF), SPIN-code: 1471-9700, ORCID, degaev@inbox.ru

Sergey L. Pushenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Safety of Technological Processes and Productions Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7292-1956, ORCID, slpushenko@yandex.ru

Claimed contributorship:
All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ TECHNOSPHERE SAFETY



Check for updates

УДК 602.807.2
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49

Научная статья

Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата



EDN: WDNKXY

И.Ю. Курносов ✉, **А.Э. Филин**, **С.В. Тертычная**
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Российская Федерация
✉ kurnosovilya@yandex.ru

Аннотация
Введение. Вредные компоненты рудной пыли, образующейся при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата (ППЖК) на стадии смешивания, наносят ущерб как работникам, так и оборудованию. Для решения этой проблемы применяется орошение жидкостным аэрозолем с использованием форсунок больших диаметров (>20 мкм). Однако данный метод неэффективен в улавливании мелкодисперсных частиц пыли, поэтому повышение эффективности метода осаждения орошением пыли ППЖК становится актуальной задачей. Целью данного исследования является изучение воздействия технологии «Сухой туман», генерирующей капли жидкости размером до 20 мкм, на этапе разгрузки ППЖК горно-металлургического предприятия при осаждении взвешенной мелкодисперсной пыли. Основной задачей данного исследования являлась оценка эффективности и возможных преимуществ применения технологии «Сухой туман» для орошения пыли с последующим осаждением, поскольку к пыли ППЖК описанная выше технология ранее не применялась.
Материалы и методы. Эксперимент по осаждению пыли ППЖК проводился в специально созданном лабораторном стенде. Посредством физического моделирования были получены параметры процесса осаждения. Далее полученные результаты подвергались анализу с точки зрения получения зависимости осаждения пыли с течением времени с учетом влияния технологии «Сухой туман». Для физического моделирования была разработана программа эксперимента. Согласно данной программе, пыль равномерно загружалась внутрь лабораторного стенда (сверху), распределялась в воздушном потоке по всему объему стенда крыльчаткой, а прибор, расположенный в нижней части, фиксировал изменение концентрации во времени. Далее были проведены эксперименты по осаждению пыли с применением жидкостного орошения. Совместно с загрузкой пыли в объем лабораторного стенда посредством форсунок, генерирующих капли размером 10 и 15 мкм, подавалась жидкость — отфильтрованная вода. Эффективность технологии «Сухой туман» при осаждении пыли ППЖК определялась визуально, и далее — на основании сопоставления графиков. Изучалась динамика изменения усредненных концентраций пыли от времени как при осаждении без орошения, так и с применением технологии «Сухой туман». В процессе эксперимента фиксировались характеристики микроклимата внутри лабораторного стенда (влажность, температура и скорость движения воздуха) и параметры двух форсунок — их рабочее давление и время распыления подаваемой жидкости.
Результаты исследования. Сравнение результатов эксперимента показало уменьшение времени осаждения на 40 % и 75 % при использовании форсунок на 10 мкм и 15 мкм соответственно.
Обсуждение и заключение. По результатам эксперимента подтверждена эффективность технологии «Сухой туман» для осаждения пыли ППЖК при разгрузке на стадии смешивания. Полученные базисные результаты позволят в дальнейшем оценить эффективность осаждения пыли с применением дополнительно режима пульсирующей вентиляции. В таком сочетании ожидается повышение эффективности осаждения еще на 20–25 % относительно результатов, представленных в данной статье. Полученные результаты дают возможность обосновать рациональные параметры и применить на производстве вышеописанный способ для повышения эффективности осаждения пыли. Помимо этого, они создают основу для разработки методики ускорения осаждения пыли ППЖК с применением метода пульсирующей вентиляции.

Ключевые слова: рудничная пыль, пыль продуктов подготовки железорудного концентрата, железорудный концентрат, жидкостное орошение, массоперенос, эксперимент по осаждению, жидкостный аэрозоль, пылеводяной аэрозоль, метод пульсирующей вентиляции

Благодарности. Авторы благодарят редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи. Также авторы благодарят коллектив и руководителя кафедры «Техносферная безопасность» НИТУ МИСИС за поддержку в создании лаборатории и реализации исследований.

Для цитирования. Курносов И.Ю., Филин А.Э., Тертычная С.В. Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):41–49. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49

Original article

Assessment of the Spraying System Impact at the Preparation Stage of Iron Ore Concentrate Products

Ilya Yu. Kurnosov ✉, **Aleksandr E. Filin**, **Svetlana V. Tertychnaya**
National University of Science and Technology (MISiS), Moscow, Russian Federation
✉ kurnosovilya@yandex.ru

Abstract

Introduction. Harmful components of ore dust, formed during the unloading of products in the preparation of iron ore concentrate (PPIOC) at the mixing stage, cause damage to both workers and equipment. To address this issue, liquid aerosol spraying using nozzles with large diameters (>20 µm) is used. However, this method proves ineffective in capturing fine-dust particles. Therefore, enhancing the efficiency of the dust deposition method through PPIOC dust spraying becomes a pressing challenge. The aim of this study is to investigate the impact of the Dry Fog technology, generating liquid droplets up to 20 µm in size, during the unloading stage of PPIOC at a mining and metallurgical enterprise in the precipitation of suspended fine-dust particles. The primary goal of this research was to assess the effectiveness and potential advantages of applying the Dry Fog technology for dust spraying with subsequent precipitation, as this technology has not been previously applied to PPIOC dust.

Materials and Methods. The experiment on the PPIOC dust deposition was conducted in a specially designed laboratory setup. Through physical modeling in the laboratory setup, parameters of the precipitation process were obtained. Subsequently, the results were analyzed to understand the dependence of dust precipitation over time, taking into account the influence of the Dry Fog technology. An experiment program was developed for physical modeling. According to the devised program, dust was uniformly loaded into the interior of the laboratory setup (from the top), distributed in the air stream throughout the volume of the setup by a fan, and an instrument located at the bottom recorded changes in concentration over time. Experiments on dust precipitation were then conducted using liquid spraying (filtered water as the liquid) introduced into the setup through nozzles generating droplets with sizes of 10 and 15 µm, concurrently with the loading of dust into the laboratory setup. The effectiveness of the Dry Fog technology in the deposition of PPIOC dust was determined visually and further analyzed based on a comparison of graphs. The dynamics of changes in the average dust concentrations depending on time was studied both during precipitation without spraying and using the Dry Fog technology. During the experiment, the characteristics of the microclimate inside the laboratory setup (humidity, temperature and air velocity) and the parameters of two nozzles — their operating pressure and the supplied liquid spraying time — were recorded.

Results. The comparison of the results showed a reduction in the dust precipitation time by 40 % and 75 % when using nozzles with sizes of 10 µm and 15 µm, respectively.

Discussion and Conclusion. The experiment results confirm the effectiveness of the Dry Fog technology for PPIOC dust precipitation during unloading at the mixing stage. Fundamental findings have been obtained, providing a basis for further assessment of the efficiency of dust precipitation with the additional application of pulsating ventilation. In such a combination, an additional 20–25 % increase in precipitation efficiency is anticipated compared to the results presented in this article. The obtained results will support the justification of rational parameters and the implementation of the described method in production to enhance dust precipitation efficiency. Additionally, they will aid in developing a methodology to accelerate the PPIOC dust precipitation using the pulsating ventilation method.

Keywords: ore dust, dust from iron ore concentrate preparation products, iron ore concentrate, liquid spraying, mass transfer, dust deposition experiment, liquid aerosol, dust aerosol, pulsating ventilation method

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the Editorial team of the journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article. Additionally, the authors would like to thank the team and the head of the Technosphere Safety Department at NUST MISIS for their support in establishing the laboratory and conducting the research.

For citation. Kurnosov IYu, Filin AE, Tertychnaya SV. Assessment of the Spraying System Impact at the Preparation Stage of Iron Ore Concentrate Products. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):41–49. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49

Введение. В целях снижения концентрации атмосферной пыли на участках производства в горно-металлургическом комплексе успешно применяются разнообразные инновационные методы и передовые технологии обеспыливания. Используют фильтрационные системы, циклоны и вентиляционные установки, специально разработанные для эффективного улавливания и удаления мельчайших частиц пыли [1–3]. Помимо этого, инженеры применяют методы жидкостного орошения, аэрофлотации и другие передовые технологии, которые совместно обеспечивают комплексный подход к решению проблемы запыленности. Эффективность предпринимаемых мер по обеспыливанию тесно связана с уникальными особенностями производственных процессов, характеристиками применяемого оборудования, конструктивными особенностями помещений и другими важнейшими факторами. Систематическая забота о техническом состоянии оборудования не просто является частью технологического процесса, а выступает важным элементом стратегии по снижению воздействия производственной деятельности на окружающую среду, способствует оптимизации производственной эффективности. Комплексное внедрение вышеперечисленных мероприятий — совмещение различных методов и технологий — позволяют достичь максимальной эффективности в уменьшении уровня пылевой нагрузки в пределах рабочей зоны.

На этапе разгрузки и подготовки железорудного концентрата, где формируется значительное количество мельчайшей дисперсной пыли, продолжительное время используется система жидкостного орошения [4–6]. Для создания мельчайшего жидкостного аэрозоля применяются разнообразные виды форсунок, образующих капли диаметром от 30 до 150 мкм. Помимо этого, используются форсунки и с более крупным диаметром. Время оседания t мельчайшей дисперсной пыли (d = 1–10 мкм) при использовании таких форсунок может быть достаточно продолжительным и достигать 25 400 с (около 7 часов) [6]. На других этапах производства для эффективного пылеосаждения применяется передовая технология — «Сухой туман». В этой технологии используются форсунки меньшего диаметра, распыляющие жидкость с дисперсностью капель в диапазоне от 1 до 20 мкм [7]. В данной технологии каждая капля жидкости служит эффективным инструментом для захвата и обеспечения оседания самых мельчайших частиц, создавая уникальное сочетание технологии и инженерного искусства в борьбе с проблемой атмосферной запыленности.

Исследований, связанных с применением вышеописанной технологии для осаждения мелкодисперсной пыли при подготовке продуктов железорудного концентрата, ранее не проводилось. Поэтому целью данной работы был анализ воздействия технологии «Сухой туман», при которой генерируются капли жидкости размером до 20 мкм, на этапе разгрузки ППЖК горно-металлургического предприятия при осаждении взвешенной мелкодисперсной пыли. Задачей стала оценка эффективности и возможных преимуществ применения технологии «Сухой туман» для орошения пыли с последующим осаждением.

Материалы и методы. Для оценки эффективности инновационной технологии «Сухой туман» провели серию экспериментов пылеосаждения мельчайших частиц продуктов железорудного концентрата с использованием форсунок, имеющих диаметры 10 и 15 мкм. Для выполнения эксперимента был разработан лабораторный стенд (рис. 1). Данный стенд использовался для анализа осаждения угольной пыли в [8]. Он представляет собой кубическую емкость объемом 1 м^3, изготовленную из органического стекла в алюминиевой раме.

В роли средства для мониторинга концентрации частиц в атмосфере использовался высокоточный измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц — АЭРОКОН-П. Данный измерительный прибор был разработан с учетом требований к определению массовой концентрации пыли с разнообразным происхождением и химическим составом. Измеритель массовой концентрации обладает уникальной способностью регистрировать дисперсность исследуемых частиц, включая те, которые имеют диаметр до 10 мкм.

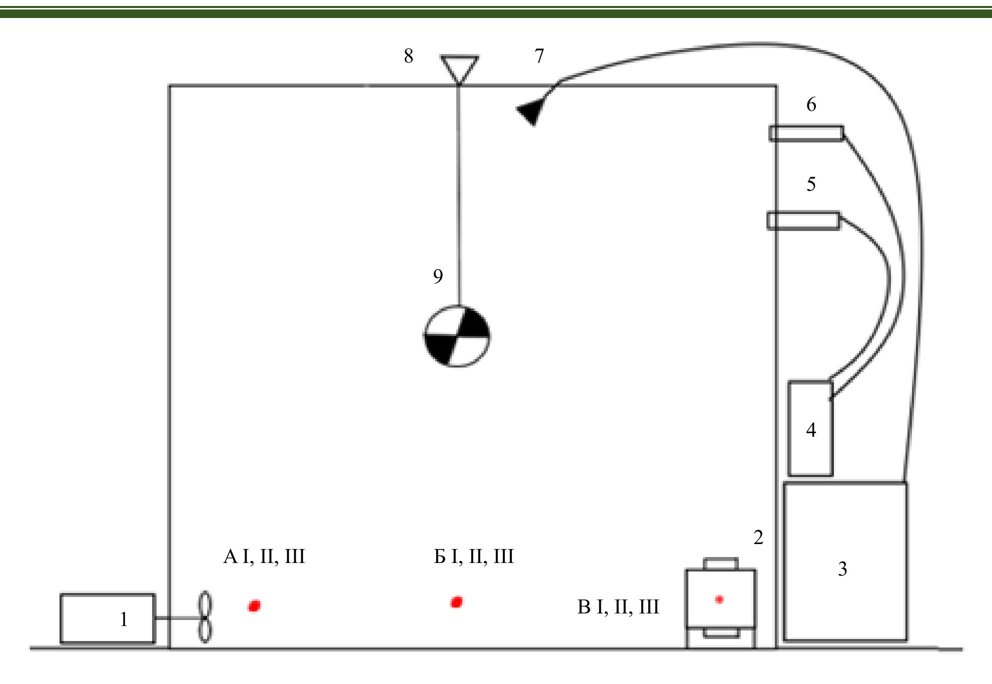


Рис. 1. Лабораторный стенд для осаждения пыли со схемой размещения оборудования и точками измерений: 1 — генератор воздушного потока; 2 — высокоточный измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц — «АЭРОКОН-П»; 3 — генератор тумана; 4 — метеометр; 5 — датчик влажности; 6 — датчик температуры; 7 — форсунка; 8 — засыпная воронка; 9 — воздушный пульсатор

Порядок проведения измерений обозначены на рис. 1 буквами А, Б, В (расположение датчика Аэрокон-П) (2). Значения I, II и III (находящиеся рядом с буквами) соответствуют точкам проведения измерений. Согласно вышеописанной схеме, эксперимент проводился по всей площади дна лабораторного бокса, а именно в 9-и его точках (точки измерения I, II, III следует понимать, как располагаемые в перспективе, т.е. друг за другом).

Эксперименты по осаждению пыли производились при контроле параметров микроклимата. Данные параметры на момент проведения эксперимента по осаждению контролировались при помощи метеометра TESTO 435 (4). При проведении экспериментов по осаждению пыли метеометр использовался для контроля параметров пылевоздушной среды в лабораторном боксе — температуры и влажности воздуха. Это позволило установить начальные условия эксперимента и провести его в контролируемых условиях. Описанный выше измерительный прибор был задействован для мониторинга и поддержания влажности воздуха внутри стенда в пределах 25–30 % и температуры — в диапазоне от 22 °С до 25 °С. Оценка скорости движения воздушного потока, исходящего из генератора, проводилась с использованием цифрового крыльчатого анемометра, что обеспечивало стабильную скорость движения воздуха на уровне 4 м/с. Для моделирования системы орошения в лабораторном стенде использовалась установка E218, предназначенная для туманообразования посредством распыления жидкости из различных форсунок (рис. 1). Рабочее давление данной установки составляет 5,4 МПа, а максимальное — 12,41 МПа. Для эксперимента в данной установке использовались форсунки диаметром 15 мкм и 10 мкм (рис. 1).

Размеры частиц пыли, используемой при проведении эксперимента по осаждению, согласно гранулометрического анализа, находились в диапазоне от 1 мкм до 40 мкм (рис. 2). Поскольку прибор для регистрации концентрации частиц в воздухе измеряет частицы диаметром до 10 мкм, требовалось определить процентное содержание этих частиц в пробе пыли. Согласно данному анализу, требуемый размер частиц пыли, используемый для проведения эксперимента по осаждению, составляет примерно 10 % от 1 грамма навески, используемой при анализе пыли [9]. Для корректного определения прибором изменения концентрации навеска исследуемой пыли была увеличена до 5 грамм с целью повышения концентрации мелкодисперсной пыли с диаметром от 1 мкм до10 мкм.

Эксперимент по осаждению пыли был реализован в лабораторном стенде, описанном ранее, с соблюдением всех параметров микроклимата, регулируемых соответствующими измерительными устройствами. Заданное количество пыли массой $m = 5$ г вводилось в объем лабораторного бокса в течение 3–5 секунд с использованием засыпной воронки (рис. 1). Во время этого процесса генератор воздушного потока был активирован, обеспечивая подачу воздуха со скоростью $V = 4$ м/с. Измерительное устройство АЭРОКОН-П, используемое в роли измерителя массовой концентрации аэрозольных частиц, периодически регистрировало данные о концентрации пыли с интервалом в 5 секунд, автоматически передавая полученные значения на

монитор компьютера [10]. Этап эксперимента по осаждению пыли завершался в момент достижения значения концентрации пыли, зарегистрированного прибором, равным n = 0,00 мг/м^3. Достижение данного значения считалось индикатором завершения эксперимента, при котором весь пылевой материал в лабораторном боксе считался осевшим.

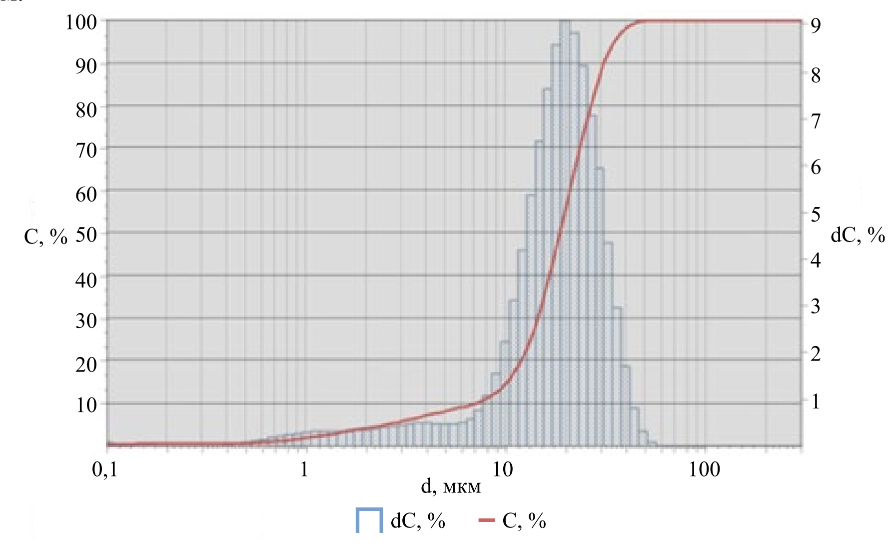


Рис. 2. Гранулометрический анализ пыли агломерационного производства горно-металлургического комплекса:
C — процентное распределение количества частиц в пробе по размерам, %;
dC — интегральное распределение процентного количества частиц в пробе по размерам, %;
d — размер частиц в пробе

Используя аналогичные параметры температуры, влажности и скорости движения воздуха при проведении эксперимента по пылеосаждению, исследования осаждения пылеводяного аэрозоля проводились при поочередном использовании 2-х форсунок (d = 10 и d = 15 мкм) и контроле подаваемого давления (p = 5,4 МПа) жидкости. Помимо этого, осуществлялся контроль времени распыления t = 2 мин (по истечению 2 мин влажность воздуха в лабораторном стенде становится максимальной и составляет 98,5 %).

Результаты исследования. В описанных условиях для обеспечения достоверности экспериментальных данных была выполнена серия из 10 экспериментов по осаждению пыли. Результаты данных экспериментов были обработаны, сведены в графики и проанализированы. Графики изменения значений концентрации пыли с течением времени при проведении 10 экспериментов от времени осаждения приведены на рис. 3.

В соответствии с графиком, представленном на рис. 3, среднее время осаждения пыли при отсутствии орошения и использовании пульсирующей вентиляции составляет в среднем 1 828 секунды (30,5 минуты). В течение этого времени пыль в условиях производства находится в воздухе рабочей зоны и наносит вред не только оборудованию, но и персоналу предприятия.

Результаты 10 экспериментов по осаждению пылеводяного аэрозоля с использованием 2-х форсунок также были представлены в виде графиков динамики изменения средних значений концентрации от времени осаждения аэрозолей (рис. 4, 5).

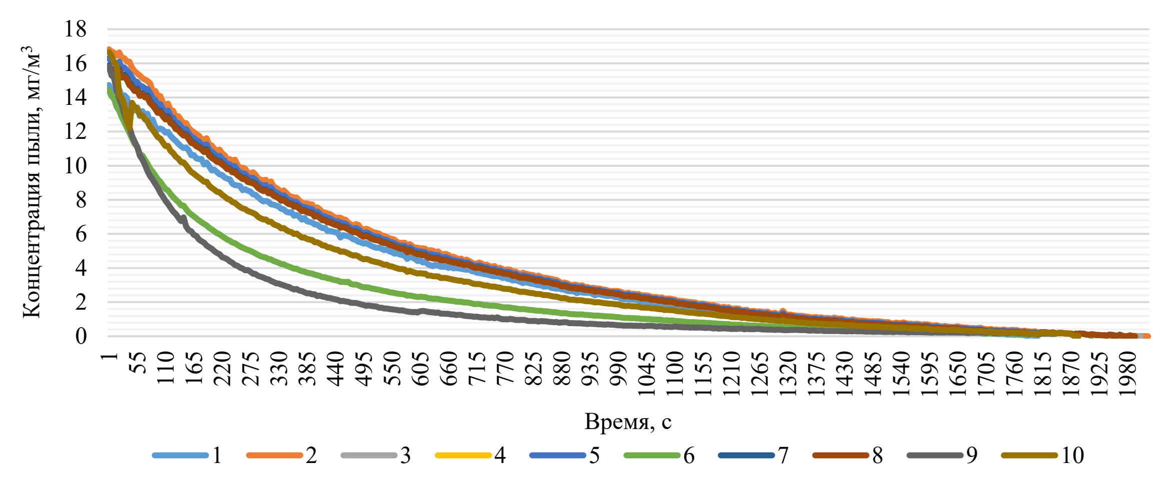


Рис. 3. Графики изменения концентрации пыли от времени по результатам 10 экспериментов

Согласно графикам, представленным на рис. 4, среднее значение времени осаждения пылеводяного аэрозоля при использовании форсунок диаметром 10 мкм, составляет 1115 с (18,5 мин). Эффективность данного способа, относительно времени самоосаждения пыли, составляет порядка 40 %. Однако, согласно рис. 5, при использовании форсунки диаметром 15 мкм, среднее время осаждения пылеводяного аэрозоля составляет 475 с (≈ 8 мин.). Эффективность данного способа составляет 74 %.

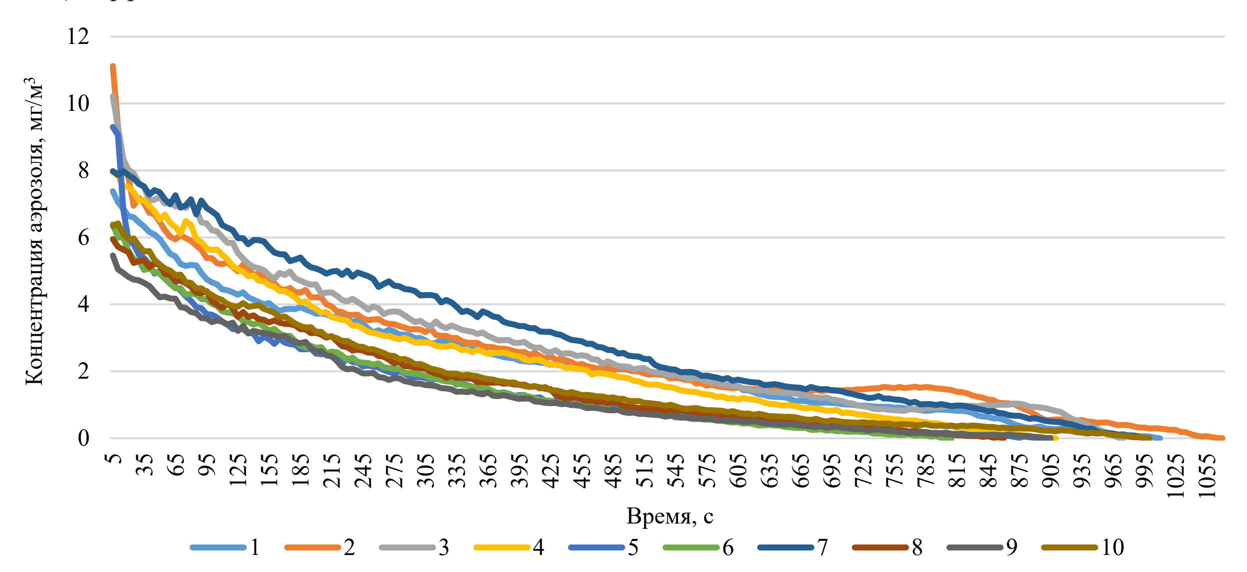


Рис. 4. Графики изменения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени (диметр форсунки 10 мкм)

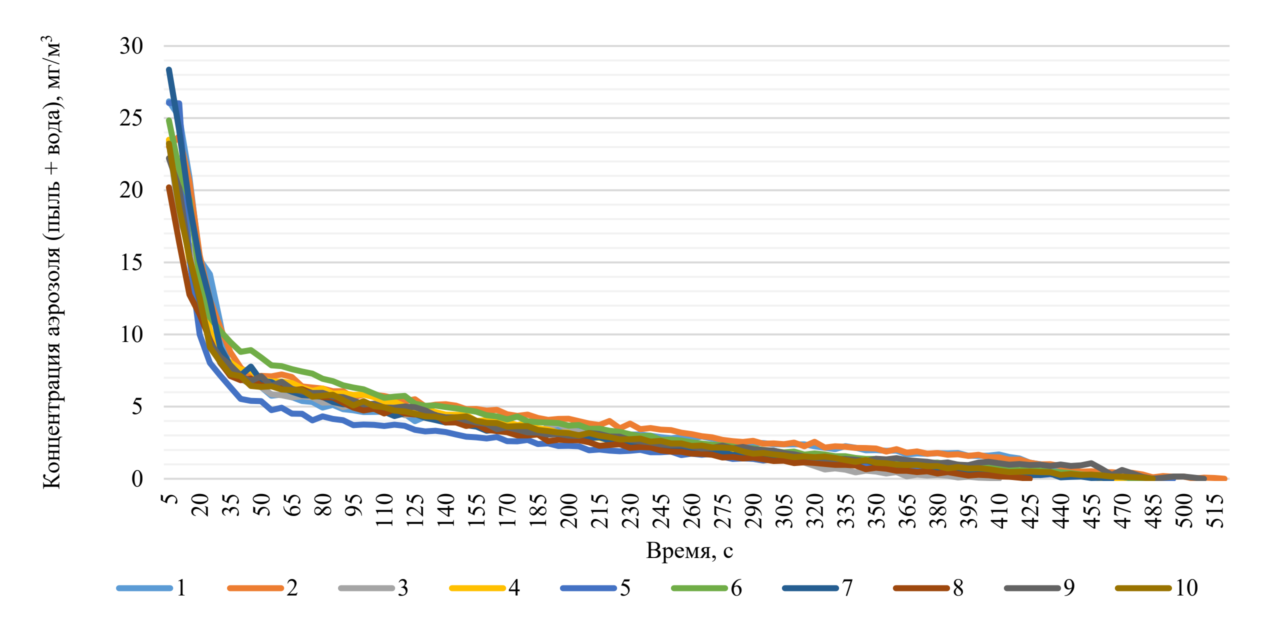


Рис. 5. Графики изменения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени (диметр форсунки 15 мкм)

На рис. 6 представлены пересчитанные зависимости концентрации аэрозолей, полученные в результате экспериментов по орошению с использованием форсунок диаметром 10 мкм и 15 мкм. В ходе экспериментов были обнаружены разные концентрации пыли, которые были зарегистрированы прибором. Для удобства представления эти концентрации были пересчитаны и выражены в виде процентного соотношения, зависящего от времени осаждения.

При сравнении определенных ранее значений эффективности осаждения пыли с применением форсунок на 10 и 15 мкм, последние дают значительный эффект. С применением форсунки на 15 мкм значение эффективности осаждения пыли примерно в 2 раза выше, чем с форсункой на 10 мкм. При использовании форсунки на 15 мкм частицы пыли проявляют низкую склонность к слипанию между собой и менее эффективно формируют капли жидкости больших размеров, что снижает эффект «конденсата» в процессе орошения. Мелкодисперсные капли лучше заполняют пылевоздушную среду и могут использоваться в тех местах технологического производства, где капли больших размеров могут нанести ущерб.

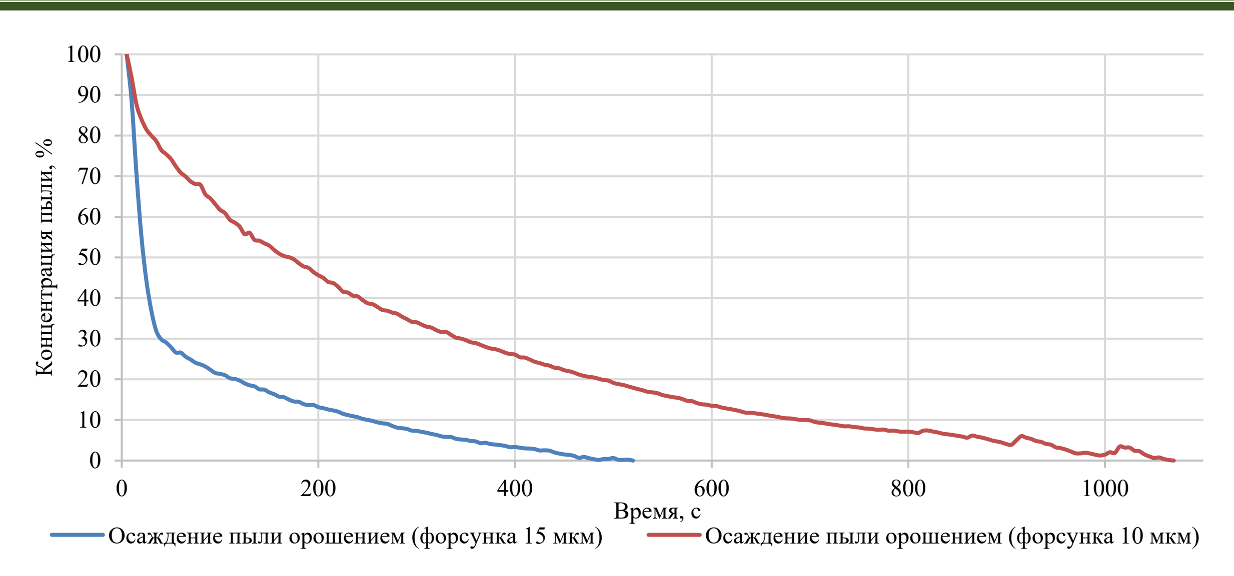


Рис. 6. График изменения концентраций пыли (%) от времени в условиях пылеосаждения орошением при применении форсунок с диметрами 15 мкм и 10 мкм

Обсуждение и заключение. В результате проведенных экспериментов по осаждению пыли в лабораторном стенде было установлено время осаждения пыли при двух различных сценариях: при естественном осаждении пыли и при осаждении пылеводяного аэрозоля (путем воздействия жидкостного аэрозоля с использованием форсунок диаметром 10 и 15 мкм).

В дальнейшем для разработки методики по осаждению пыли необходимо использовать следующие параметры, как рациональные:

– влажность воздуха внутри лабораторного — φ = 25–30 %;

– температура воздуха в лабораторном стенде — *T* = 22–25 °С;

– скорость движения воздуха, создаваемая генератором воздушного потока, должна быть на уровне *V*=4 м/с.

Также следует использовать следующие технические параметры системы орошения:

– для рассеивания жидкости рекомендуется использовать форсунки с диаметрами 10 мкм и 15 мкм;

– рабочее давление в системе подачи жидкости — *p* = 5,4 МПа;

– время распыления аэрозоля жидкости — 2 мин.

Полученные результаты показывают разные значения эффективности осаждения пыли с применением форсунок, генерирующих разные диаметры капель, применяемых в процессе орошения. Описанные в статье форсунки демонстрируют значительное улучшение процесса пылеосаждения орошением при использовании форсунок на 10 и 15 мкм, нежели при использовании в процессе орошения форсунок, генерирующих капли размером больше 15 мкм [7]. Кроме этого, уменьшение количества влаги в воздушной среде производственных цехов будет оказывать меньшее негативное воздействие на оборудование.

Анализ полученных данных подтвердил более высокую эффективность процесса осаждения пыли при использовании технологии «Сухой туман» во время разгрузки ППЖК на этапе смешивания. Полученные результаты предоставляют основу для дальнейшей оценки эффективности процесса осаждения пыли уже при использовании метода пульсирующей вентиляции. Ориентируясь на работы других авторов, использующих данную технологию [7], прогнозируется дополнительное повышение значений эффективности осаждения на 20–25 %, относительно применения технологии «Сухой туман». Полученные в данной работе результаты будут использованы при разработке в дальнейшем методики осаждения пыли продуктов железорудного концентрата с использованием метода пульсирующей вентиляции.

Полученные значения показателей эффективности технологии «Сухой туман» дают основание рекомендовать его для внедрения на производстве для осаждения пыли на участках горно-металлургических производств с высокой пылевой нагрузкой.

Список литературы

1. Калимулина Е.Г., Темников В.В. Утилизация пылей аспирации сталеплавильного производства в АО «ЕВРАЗ НТМК» *Черные металлы.* 2018;(7):38–40.

2. Казюта В.И. Очистка газов ферросплавных печей в рукавных фильтрах. *Сталь.* 2022;(4):51–61.

3. Петров Г.В., Фокина С.Б. Повышение промышленной и экологической безопасности электросталеплавильного производства на основе переработки отвальных цинксодержащих пылей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017;(S5–2):277–285.

4. Кочетов О.С., Отрубянников Е.В. Форсуночный скруббер для очистки газов от пыли и химических вредных веществ. В*: Труды международной научно-практической конференции инновационный путь развития как ответ на вызовы нового времени Магнитогорск, 20 сентября 2021 года.* Уфа: Аэтерна; 2021. С. 48–49.

5. Сницерева В.П., Козлова Л.О. Источники пылеобразования и комплексное обеспыливание на Жезказганских обогатительных фабриках. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2021;(S1–1):38–46. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_1_1_38

6. Cecala A.B., O'Brien A.D. *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing.* CreateSpace Independent Publishing Platform; 2015. 312 p.

7. Chaulya S.K., Chowdhury A., Sunil Kumar, Singh R.S., Singh S.K., Singh R.K., et al. Fugitive dust emission control study for a developed smart dry fog system. *Journal of Environmental Management.* 2021;(285):112116. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112116

8. Филин А.Э., Курносов И.Ю., Колесникова Л.А., Овчинникова Т.И., Колесников А.С. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты. *Уголь.* 2022;9(1158):67–72. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72

9. Красилова В.А., Эпштейн С.А., Коссович Е.Л., Козырев М.М., Ионин А.А. Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции. *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). 2022;(2):5–16. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_5

10. Сухих Е.А., Крылов А.А., Смольникова А.И., Антипьева М.В., Уланова Т.С. Методы определения респирабельных фракций мелкодисперсных частиц в воздушной среде. В: *Труды международной научно-практической конференции «Здоровье и окружающая среда» Минск, 19–20 ноября 2020 года.* Минск: Белорусский государственный университет; 2021. С. 454–457.

References

1. Kalimulina EG, Temnikov VV. Utilization of aspiration dusts in steelmaking production at “EVRAZ NTMK” JSC. *Chernye metally.* 2018;(7):38–40. (In Russ.).

2. Kazyuta VI. Clearing ferroalloy furnaces’ gases in bag filters. *Stal'.* 2022;(4):51–61. (In Russ.).

3. Petrov GV, Fokina SB. Increase of industrial and ecological safety of electrosteel-smelting production on the basis of processing of zinc-containing dump dusts. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017;(S5–2):277–285. (In Russ.).

4. Kochetov OS, Otrubyannikov EV. Forsunochnyi skrubber dlya ochistki gazov ot pyli i khimicheskikh vrednykh veshchestv. In: *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Innovatsionnyi put' razvitiya kak otvet na vyzovy novogo vremeni Magnitogorsk, September 20, 2021.* Ufa: Aeterna; 2021. P. 48–49. (In Russ.).

5. Snitsereva VP, Kozlova LO. Sources of dust formation and integrated dusting at zhezkazgan concentrating factories. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2021;(S1–1):38–46. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_1_1_38 (In Russ.).

6. Cecala AB, O'Brien AD. *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing.* CreateSpace Independent Publishing Platform; 2015. 312 p.

7. Chaulya SK, Chowdhury A, Sunil Kumar, Singh RS, Singh SK, Singh RK, et al. Fugitive dust emission control study for a developed smart dry fog system. *Journal of Environmental Management.* 2021;285:112116. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112116

8. Filin AE, Kurnosov IYu, Kolesnikova LA, Ovchinnikova TI, Kolesnikov AS. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'.* 2022;9(1158):67–72. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72 (In Russ.).

9. Krasilova VA, Epshtein SA, Kossovich EL, Kozyrev MM, Ionin AA. Development of method for coal dust particle size distribution characterization by laser diffraction. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2022;(2):5–16. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_5 (In Russ.).

10. Sukhikh EA, Krylov AA, Smol'nikova AI, Antip'eva MV, Ulanova TS. Metody opredeleniya respirabel'nykh fraktsii melkodispersnykh chastits v vozdushnoi srede. In: *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Zdorov'e i okruzhayushchaya sreda" Minsk, November 19–20, 2020.* Minsk: Belarusian State University; 2021. P. 454–457. (In Russ.).

Поступила в редакцию 10.11.2023
Поступила после рецензирования 05.12.2023
Принята к публикации 12.12.2023

Сведения об авторах:

Илья Юрьевич Курносов, аспирант, ассистент кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), SPIN-code: 5258-2876, ORCID, kurnosovilya@yandex.ru

Александр Эдуардович Филин, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), SPIN-code: 2093-0680, ORCID, aleks_filin@bk.ru

Светлана Вячеславовна Тертычная, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), ResearcherID, SPIN-code: 2956-1736, ORCID, svetter@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И.Ю. Курносов — проведение эксперимента, толкование логики полученных данных, формирование основанного текста статьи, обработка результатов исследования, перевод на иностранный язык.

А.Э. Филин — постановка задачи и цели исследования, предоставления научной базы и формирование методики эксперимента, контроль результатов эксперимента и формирование обоснования теории исследования.

С.В. Тертычная — обработка литературных источников, предоставление научной базы, формирование выводов исследования, редактирование текста и графиков рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 10.11.2023
Revised 05.12.2023
Accepted 12.12.2023

About the Authors:

Ilya Yu. Kurnosov, Post-graduate student, Assistant of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology (MISiS) (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, RF), SPIN-code: 5258-2876, ORCID, kurnosovilya@yandex.ru

Aleksandr E. Filin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology (MISiS) (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, RF), SPIN-code: 2093-0680, ORCID, aleks_filin@bk.ru

Svetlana V. Tertychnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology (MISiS) (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, RF), ResearcherID, SPIN-code: 2956-1736, ORCID, svetter@mail.ru

Claimed contributorship:

IYu Kurnosov: conducting the experiment, interpreting the logic of the data obtained, creating the basis for the article, analyzing the research results, translating into a foreign language.

AE Filin: setting the goals and objectives of the study, providing a theoretical basis and developing the methodology for the experiment, monitoring the results of the experiment and justifying the theory behind the research.

SV Tertychnaya: processing of literary sources, providing a scientific base, forming research conclusions, editing the text and graphs of the manuscript.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY



Check for updates

УДК 331.453
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-50-57

Научная статья



EDN: WMKRZO

Обеспечение безопасных условий труда при воздействии на работников поездных бригад виброакустических факторов

Д.А. Соколов, Е.И. Головина ✉
Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация
✉ u00111@vgasu.vrn.ru

Аннотация
Введение. Повышенная интенсивность шума и вибрации на железнодорожном транспорте может стать не только актуальной проблемой в области охраны труда, но и серьезной экологической проблемой в ближайшем будущем из-за необходимости постоянного увеличения веса грузовых поездов, повышения скорости движения пассажирских поездов и возрастания пропускной способности железнодорожных линий. В последнее время немало сделано для минимизации негативного воздействия шума и вибрации на железнодорожном транспорте. Однако проблема превышения показателей виброшумовых факторов остается актуальной. Уменьшение вредного воздействия шума и вибрации способствует улучшению условий труда работников поездных бригад и повышению комфортных условий для пассажиров. Как правило, основное внимание при анализе воздействия виброакустических факторов уделяется внешнему их воздействию на селитебную территорию и меньше — воздействию на подвижной состав. К тому же такие исследования не являются комплексными, так как не дают полного представления о воздействии шума и вибрации непосредственно на состав в движении. Цель данного исследования — анализ воздействия виброакустических факторов на работников поездных бригад и пассажиров для разработки метода их комплексной защиты, основанного на применении виброгасящих материалов.
Материалы и методы. В ходе работе были изучены нормативные документы, проведен комплексный анализ актуальной информации по данной теме, использованы методики по расчету вибрации и виброускорения. Значения уровней звукового давления были получены с помощью шумомера SPM-101. Объектом исследования был выбран вагон типа «плацкарт» во время движения. В рамках исследования было измерено звуковое давление на выбранных участках дороги и определен класс условий труда.
Результаты исследований. Результат анализа воздействия виброакустических факторов на работников поездных бригад свидетельствует в необходимости усиления комплексных мер их защиты. Полученный расчет силы вибрации стал основой предложенного авторами метода минимизации вредного воздействия виброакустических факторов, в основе которого использование в конструкции вагона вибро- и звукоизолирующих материалов, подходящих по необходимым акустическим параметрам. В частности, предложено с целью шумоизоляции на пол вагона уложить плотную резину, а на потолок — материал из неорганического волокна. В работе также дана экономическая оценка эффективности мероприятий по минимизации вредного виброшумового воздействия.
Обсуждение и заключение. Предложенные методы минимизации шумового и вибрационного воздействия могут способствовать снижению уровня звукового давления и показателей вибрации до нормативных значений, что сократит негативное воздействие виброакустических факторов на работников поездной бригады и пассажиров. Рассмотренный комплекс по минимизации вибрации и шума включает в себя совокупность методов, в которых нашли применение бюджетные материалы, созданные на основе вторично переработанного сырья.

Ключевые слова: звуковое давление, вибрация, шумовое загрязнение, шумоизоляция

Благодарности. Авторы благодарят профессора, доктора технических наук Вячеслава Яковлевича Манохина за наставничество.

Для цитирования. Соколов Д.А., Головина Е.И. Обеспечение безопасных условий труда при воздействии на работников поездных бригад виброакустических факторов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):50–57. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-50-57

Original article

Ensuring Safe Working Conditions under the Influence of Vibroacoustic Factors on Train Crew Workers

Dmitriy A. Sokolov, **Elena I. Golovina** ✉
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
✉ u00111@vgasu.vrn.ru

Abstract
Introduction. The increased intensity of noise and vibration of railway traffic may become not only an urgent problem in the field of occupational safety, but also a serious environmental problem in the near future due to the constant need to increase the weight of freight trains, the speed of passenger trains and the capacity of railway lines. Recently, a lot has been done to minimize the negative effects of noise and vibration in railway transport. However, the problem of exceeding the indicators of vibration noise factors remains relevant. Reducing the harmful effects helps to improve the working conditions of train crew employees and improve the comfortable conditions of transport passengers. As a rule, the main focus of the analysis is on the external impact of vibroacoustic factors on residential areas and less attention is paid to the impact on rolling stock. However, these studies do not provide a complete picture of how noise and vibration actually affect the train in motion. The aim of the study was to obtain the result of an analysis of the impact of vibroacoustic factors on train crew workers and to propose a method of comprehensive protection based on the use of vibration damping materials.
Materials and Methods. In the course of the work, regulatory documents were studied, a comprehensive analysis of relevant information on this topic was carried out, and methods for calculating vibration and vibration acceleration were used. The values of the sound pressure levels were obtained using a SPM-101 sound level meter. The object of the study was a carriage of the "reserved seat" type in the process of movement. As part of the research plan, sound pressure was measured at selected sites and a class of working conditions was determined.
Results. The result of the analysis of the impact of vibroacoustic factors on train crew workers indicated the need to strengthen comprehensive measures to protect them. The obtained calculation of the vibration force became the basis of the method proposed by the authors to minimize the harmful effects of vibroacoustic factors, which was based on the use of vibration and sound insulation materials suitable for the necessary acoustic parameters in the construction of the car. In particular, it was proposed to cover the floor of the car with dense rubber and the ceiling of the car with an inorganic fiber material for sound insulation. The work also provides an economic assessment of the effectiveness of measures to minimize harmful vibration noise effects.
Discussion and Conclusion. The proposed methods for minimizing noise and vibration impacts can help reduce the level of sound pressure and vibration indicators to standard values, which will significantly reduce the negative impact of vibroacoustic factors on train crew workers and railway passengers. The considered complex for minimizing vibration and noise includes a set of methods in which affordable materials based on recycled substances have found application.

Keywords: sound pressure, vibration, noise pollution, sound insulation

Acknowledgements. The authors would like to thank Professor, Doctor of Engineering Science Vyacheslav Yakovlevich Manokhin for his mentoring.

For citation. Sokolov DA, Golovina EI. Ensuring Safe Working Conditions under the Influence of Vibroacoustic Factors on Train Crew Workers. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):50–57. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-50-57

Введение. Железнодорожный транспорт всегда вызывал и вызывает шум и вибрацию, которые в большинстве случаев не могут быть полностью устранены и, скорее всего, будут негативно влиять на окружающую среду невзирая на применение различных методов смягчения их воздействия. Проблема уменьшения влияния шума и вибрации железнодорожного транспорта на людей и воздействия на инженерные конструкции очень сложна из-за большого количества параметров и факторов распределения шумовой и вибрационной энергии. Негативное влияние виброакустических факторов растет с каждым годом в связи с увеличением количества и веса грузовых вагонов, большого их износа, несвоевременным техническим обслуживанием пассажирских вагонов, а также

нехваткой свободного пространства в городских районах, в результате чего новые деловые и жилые объекты размещаются в непосредственной близости от железной дороги. Проблема шума и вибрации от железнодорожного транспорта особенно остро стоит в крупных городах с большим железнодорожным сообщением главным образом из-за малого расстояния от железнодорожных путей до ближайших зданий. Этот факт ограничивает возможности для принятия мер по снижению уровня шума и вибрации. На сегодняшний день первостепенной задачей является защита от превышения звукового давления по системе «внешний источник шума — окружающая среда». Система подразумевает воздействие шума на близко расположенные объекты инфраструктуры, жилые зоны, природу. Защита от такого рода воздействий достигается установкой акустических экранов. С их помощью возможно значительно сократить звуковое давление.

Малоизученной до сих пор является проблема комплексной защиты от виброакустического воздействия. Стоит также отметить и недостаток вибродемпфирующих устройств, которые были бы способны снижать совокупное воздействие шума и вибрации. По мнению авторов, научная новизна данного исследования заключается именно в том, что рассмотрен комплексный подход к решению проблемы минимизации воздействия виброакустических факторов и предложены простые шумопоглощающие материалы для массовой их установки.

Вибрация от рельсового транспорта может оказывать негативные воздействия непосредственно или в сочетании с фоновым шумом. Значительное превышение нормативов уровня шума доставляет дискомфорт не только работникам и пассажирам, но и жителям прилегающих к железнодорожному полотну территорий, часто является значимой причиной ухудшения самочувствия и снижения работоспособности. Специфика шумового загрязнения на железнодорожном транспорте такова, что при долгосрочном воздействии в совокупности с вибрацией оно очень негативно влияет на работников ж/д транспорта [1]. Длительное и систематическое воздействие излишнего шумового давления может привести к развитию хронических заболеваний нервной системы, опорно-двигательного аппарата, быть причиной потери бдительности, ухудшения самочувствия, ощущения дискомфорта, чувства раздражения [2]. Постоянное воздействие шума даже на номинальных значениях (особенно ночью) может стать причиной нарушений сна и хронических неврозов [3]. Количество людей с нарушениями сна очень велико — большинство сталкиваются с воздействием постоянного шума в 50–60 дБ именно ночью, что при отсутствии других дневных источников шума является одним из основных факторов бессонницы [4].

Из всех вредных экологических факторов вибрация является одним из самых массовых. Под ее воздействием находится от 50 до 70 % населения [5]. Анализ вибраций, возникающих в результате движения подвижного состава, очень важен, так как железная дорога — основная транспортная система, охватывающая большую часть территории нашей страны и стран ближнего зарубежья. С каждым годом растут объемы и количество перевозимых по железной дороге грузов [6].

Рабочая вибрация рельсов возникает на стыке колеса и рельса (система «колесо — рельс») и распространяется не только через систему опор пути на почвенный покров и окружающие здания, но и непосредственно на подвижной состав. В некоторых случаях пассажиры могут непосредственно ощущать вибрацию, которую обычно называют вибрацией от взаимодействия подвижного состава и рельсового полотна. Колебания грунта, вызванные железнодорожным движением, в основном возникают в зоне контакта между колесом и рельсом [7]. Поэтому важно, чтобы действие этого механизма возникновения негативного фактора было сведено к минимуму. Основным источником возникновения вибрации на железной дороге является вибрация при качении, вызванная неидеальной рабочей поверхностью колеса и дефектами на рабочей поверхности рельса. Эти вибрации передаются колесу и путевым конструкциям, что приводит к возникновению превышения пороговых значений по основным октавным уровням. Как следствие, вибрация, передаваясь через колесные пары, тележку, вызывает вибрацию кузова вагона, что особо ощутимо на высокой скорости поезда. Вибрации высокой амплитуды могут привести к критическому состоянию узлов вагона, к урону конструкции рельсового подвижного состава. С целью сохранения оборудования вибрации такого рода следует сокращать не только в системе «колесо — рельс», но и непосредственно принимая меры по защите основных частей вагона, это, в свою очередь, минимизирует появление вторичной вибрации от корпуса вагона. Чтобы свести к минимуму механическое воздействие колеса и рельса, поверхность рельса должна быть как можно более гладкой. Вибрации, создаваемые конструкцией вагона и тележки, также должны быть сведены к минимуму, чтобы уменьшить количество вибраций, передаваемых на людей в вагоне [8]. Для создания системы с желаемыми акустическими и структурно-динамическими свойствами при низком воздействии на человека шума и вибрации необходимо учитывать конструкцию пути, колес, тележек, вагонов. Другим важным аспектом является обеспечение технического обслуживания этих деталей соответствующим образом (своевременное техническое обслуживание и плановый ремонт).

Актуальные методы снижения вибрации, как правило, делятся на две основные категории: категория пассивных мероприятий и категория активных мероприятий. В настоящее время чаще всего используются пассивные мероприятия. К ним относится применение традиционных виброгасителей, систем амортизации ударов разного рода (соударение вагонов) и изоляции основания [5]. Однако современные методы снижения вибрации должны быть направлены на пассивно-активное управление вибрацией, которое заключается в активном приложении силы, равной противоположным силам, создаваемым внешней вибрацией. Иногда для гашения вносимых вибраций предлагается использовать разработанные системы управления и гашения сил, которые создают вибрацию, а также конструкции, созданные на основе новых композитных материалов. В частности, можно использовать пьезоэлектрические элементы в качестве гашения излишней вибрации[1]. Суть этого метода заключается в том, что пьезоэлектрический элемент вырабатывает электрическую энергию при механическом растяжении и реагирует по форме деформации, если на него подается электрическая энергия. Еще одним методом минимизации шума и вибрации является метод применения дисковых тормозов вместо чугунных колодок. Альтернативой же более сложным в адаптации, установке и дорогим дисковым тормозам является замена чугунных блоков на агломерационные или композитные. Все названные выше методы направлены на основные узлы вагона. Авторами был проведен расчет виброизоляции в самом вагоне на пассажирских местах.

Материалы и методы. В качестве материала исследования был рассмотрен вагон типа «плацкарт». Замеры проводились с помощью прибора для измерения звукового давления — шумомера SPM-101. Участки с наиболее негативным воздействием виброакустического фактора были выбраны исходя из конструктивных особенностей тележки вагона и строения внутренней структуры пространства вагона. Следовательно, план исследования включал в себя измерение звукового давления в вагоне и определение класса условий труда.

Для анализа возможности снижения шума в источнике вагона типа «плацкарт» рассмотрена схема вагона и отмечены на ней участки наиболее негативного воздействия виброакустических факторов (рис. 1). На этих участках подразумевается наибольшее звуковое давление в вагоне и как следствие — критическое негативное воздействие виброакустических факторов при различных условиях (скорость движения, состояние железнодорожного полотна и др.).

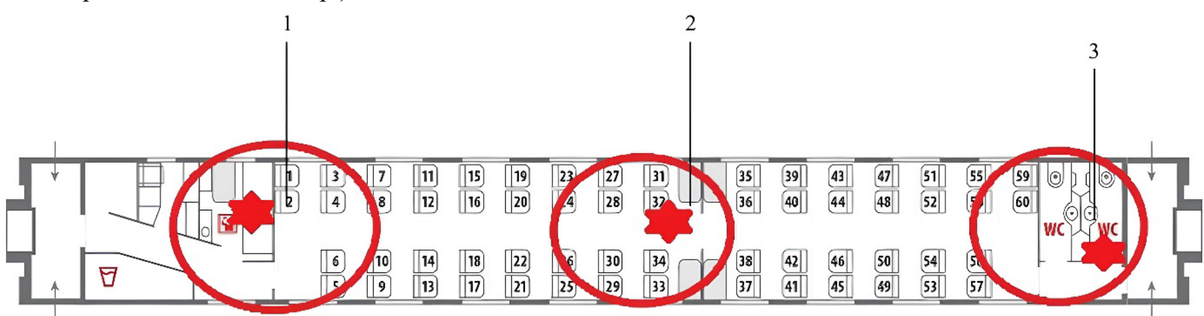


Рис. 1. Значения звукового давления в вагоне по участкам (1, 2, 3)

Следующим методом исследования минимизации вибрационного воздействия был расчет виброизоляции пассажирских мест в вагоне на основе методики[2]. Были применены виброзащитные вставки из резинового материала. Пол вагона у основания кресла вибрирует с частотой f = 50 Гц, с виброскоростью v = 0,4 м/с и массой места 22 кг. Примем массу пассажира в 70 кг. Модуль упругости: $\sigma_{доп}$ = 0,04 МПа, E = 2.5 МПа, h = 0,1 м, коэффициент сопротивления ξ = 600 Н с/м.

Определим массу, приходящуюся на вставки, когда пассажир будет сидеть. Масса пассажира, приходящаяся на сидение, составляет 70 %, значит:

$$m_{ч} = 70 \cdot 0,7 = 49 \text{ кг} \quad (1)$$

$$m_{об} = 49 + 22 = 71 \text{ кг} \quad (2)$$

Определим максимальный статический прогиб вставок:

$$Z = h\frac{\sigma_{доп}}{E_{д}} = 0,1 \cdot \frac{4}{250} = 16 \cdot 10^{-4}. \quad (3)$$

[1] Снижение уровня шума в кривых. *Железные дороги мира.* 2009;6:70–76. URL: https://zdmira.com/images/pdf/dm2009-06_70-76.pdf (дата обращения: 14.11.2023)

[2] *Пособие по акустической виброизоляции центробежных машин.* Москва: Издательство литературы по строительству; 1973. 35 с. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293801/4293801338.pdf (дата обращения: 14.11.2023)

Частотная характеристика собственных колебаний амортизированного пассажирского места будет:

$$\omega = 2\pi \frac{0,5}{\sqrt{Z}} = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,5}{16 \cdot 10^{-4}} = 79 \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Коэффициент передачи вибрации определяется по формуле:

$$T_z = \frac{1 + \left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}. \quad (5)$$

Найдем относительное демпфирование D и круговую частоту ω:

$$D = \frac{\xi}{2\omega_0 \cdot m_{об}} = \frac{600}{2 \cdot 79 \cdot 71} = 0,05. \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}; \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{314}{79} = 4. \quad (7)$$

Получим:

$$T_Z = \sqrt{\frac{1 + (2 \cdot 0,05 \cdot 4)^2}{\left[1 - (4)^2\right]^2 + (2 \cdot 0,05 \cdot 4)^2}} = 0,071. \quad (8)$$

Затем определим вибрационную скорость на сидении:

$$v = 0,4 \cdot 0,071 = 0,028 \text{ м/с}. \quad (9)$$

Частота колебания места составит:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{79}{2 \cdot 3,14} = 12,57 \text{ Гц}. \quad (10)$$

Результаты исследования. Согласно ГОСТу 33787-2019 для частоты 12,57 Гц виброскорость не должна превышать 0,0056 м/с[3]. Полученный в результате расчета показатель не соответствует данному требованию. Для его улучшения можно применить виброзащитный материал с другими характеристиками — таким может стать композитный лист из плотных резин (рис. 2). Благодаря более высокому коэффициенту сопротивления можно добиться минимизации вибрационного воздействия.

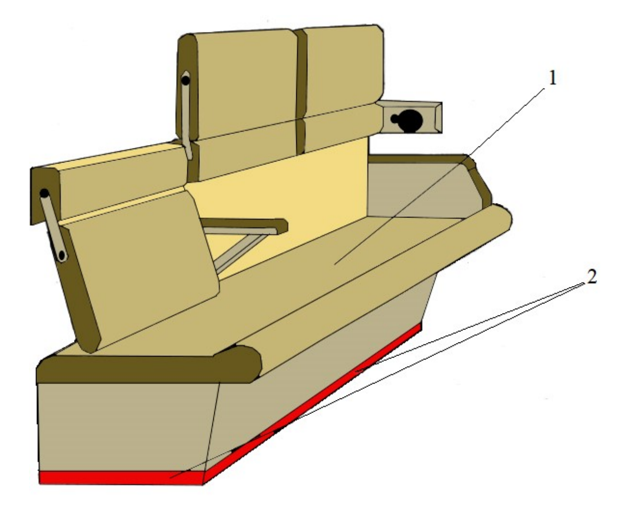


Рис. 2. Вариант расположения виброзащитного материала:
1 — пассажирское сиденье; 2 — виброзащитная вставка

[3] ГОСТ 33787-2019. *Оборудование железнодорожного подвижного состава. Испытания на удар и вибрацию*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200170805 (дата обращения: 14.12.2023).

В таблице 1 представлены результаты измерения уровней звукового давления на участках, представленных на рис. 1. Сравнив их с нормами уровня звука в вагоне по СП 2.5.3650-20, можно сделать вывод, что наблюдается превышение показателей[4].

Таблица 1

Показатели шумового давления в вагоне по зонам

Участок, №	Уровень звука, дБ
1	77,5
2	74,1
3	78,5

Проведенные в данной работе расчеты позволили авторам сделать вывод о необходимости применения метода минимизации виброакустических факторов, основанного на использовании виброгасящих материалов. Его эффективность подтверждается представленным исследованием. Авторами предложен комплекс мероприятий, включающий в себя установку в обшивку потолка вагона в наиболее подверженных шуму зонах шумопоглощающего материала для минимизации шумового загрязнения. Материал представляет собой композит из неорганических волокон толщиной листа от 2 до 4 см. Также для снижения шумового и вибрационного воздействия предложено установить вставки в пол вагона по аналогии с созданием амортизирующей системы. Для расчета эффективности метода был проведен расчет воздействия вибрации на пассажирское место с учетом вибрации пола вагона. Материал безопасен при эксплуатации для человека и окружающей среды, соответствует критериям пожарной безопасности, которые установлены для пассажирского вагона согласно распоряжению ОАО «РЖД» от 5 ноября 2009 г. № 2255р[5].

Обсуждение и заключение. Оценка воздействия вибрации и шума, полученная в данном исследовании, показывает, что оно существенно влияет на условия труда работников поездных бригад и пассажиров. Работники, которые много времени проводят в дороге, рабочие, занимающиеся ремонтом путей в непосредственной близости от железнодорожного полотна, и пассажиры поездов подвергаются крайне вредному шумо- и вибрационному воздействию, которое оказывает разрушительное воздействие на их здоровье. Поэтому так важно минимизировать это вредное воздействие в источнике его возникновения. Несомненно, улучшение существующих и внедрение новых методик минимизации последствий шумового и вибрационного факторов на железной дороге положительно повлияет на здоровье работников и будет способствовать созданию благоприятной социальной обстановки. Стоит особо подчеркнуть, что мероприятия по минимизации негативного воздействия шума и вибрации от железнодорожных составов дают относительно небольшой экономический эффект, но имеют при этом большую ценность для обеспечения защиты здоровья как работников, так и пассажиров, создания для них более комфортных условий.

В предложенном авторами комплексе мероприятий по минимизации вибрации и шума применяются материалы, созданные из вторично переработанного сырья. Для пола вагона используется плотная резина, для потолка — композит из неорганического волокна толщиной 2–4 см. Оснащением вагонов этими материалами можно достичь:

– минимизации шумового давления в вагоне на 7–12 Дб;

– уменьшения вибрационного воздействия.

Список литературы

1. Соколов Д.А. Характеристика шумового загрязнения и вибрации железнодорожного транспорта. Минимизация воздействия шума и вибрации на работников железнодорожного транспорта. *Студент и наука*. 2022;1(20):65–67.

2. Капцов В.А., Лексин А.Г. Физические факторы производственной среды и безопасность движения. *Гигиена и санитария*. 2009;5:87–93. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fizicheskie-faktory-proizvodstvennoy-sredy-i-bezopasnost-dvizheniya/viewer (дата обращения: 14.12.2023).

3. Епанчинцева Е.А. Экологические проблемы на железнодорожной дороге. В: *Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум — 2019»*. Москва; 2019. URL: https://scienceforum.ru/2019/article/2018010394 (дата обращения: 10.10.2023).

[4] *Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры.* Санитарно-эпидемиологические правила СП 2.5.3650-20. URL: https://docs.cntd.ru/document/566406892?marker=6560IO (дата обращения: 14.11.2023).

[5] *О введении Инструкции по обеспечению пожарной безопасности в вагонах пассажирских поездов.* Распоряжение ОАО «РЖД» № 2255р от 05.11.2009. URL: https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-05112009-n-2255r/?ysclid=lpav14zomo74285296 (дата обращения: 14.11.2023).

4. Головина Е.И., Соколов Д.А. Обеспечение безопасности труда при эксплуатации железнодорожного транспорта путем модернизации систем вибродемпфирующих накладок и рельсовых пластин. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;(1):39–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-39-46

5. Карабаева М.У., Саидов С.М., Юсуфханов З.Ю. Распространения вибрации при прохождении поездов в зависимости от расположения железнодорожного полотна. *Символ науки*. 2017;(5):25–27. URL: https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2017-05.pdf?ysclid=lpgkp9yw9r840350762 (дата обращения: 10.10.2023).

6. Харламов А.А., Комогорцев М.Г. Метод визуализации и оценки вибрационных воздействий на верхние строения железнодорожного пути. *Молодой ученый.* 2011;3(26):88–91. URL: https://moluch.ru/archive/26/2816/?ysclid=lpgkuevag721587460 (дата обращения: 10.10.2023).

7. Борисов Е.К., Алимов С.Г., Назаров А.Ю. Вибрация грунта от железнодорожного трафика. *Вологдинские чтения.* 2005;48:87–92.

8. Романов С.Н. *Биологическое действие вибрации и звука: Парадоксы и проблемы XX века.* Вартанян И.А. (ред.). Санкт-Петербург: Наука; 1991. 158 с. URL: https://studizba.com/files/show/djvu/165-1-romanov--biologicheskoe-deystvie.html (дата обращения: 14.12.2023).

References

1. Sokolov DA. Kharakteristika shumovogo zagryazneniya i vibratsii zheleznodorozhnogo transporta. Minimizatsiya vozdeistviya shuma i vibratsii na rabotnikov zheleznodorozhnogo transporta. *Student i nauka.* 2022;1(20):65–67. (In Russ.).

2. Kaptsov VA, Leksin AG. Physical factors of the industrial environment and traffic safety. *Hygiene and Sanitation*. 2009;5:87–93. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fizicheskie-faktory-proizvodstvennoy-sredy-i-bezopasnost-dvizheniya/viewer (accessed: 14.12.2023). (In Russ.).

3. Epanchintseva EA. Environmental problems on the railway. In: *Materialy XI Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii "Studencheskii nauchnyi forum-2019".* Moscow; 2019. URL: https://scienceforum.ru/2019/article/2018010394 (accessed: 10.10.2023). (In Russ.).

4. Golovina EI, Sokolov DA. Ensuring occupational safety at railway transport operation by upgrading the systems of vibration damping plates and rail plates. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(1):39–46. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-39-46 (In Russ.).

5. Karabaeva MU, Saidov SM, Yusufkhanov ZYu. Rasprostraneniya vibratsii pri prokhozhdenii poezdov v zavisimosti ot raspolozheniya zheleznodorozhnogo polotna. *Symbol of science*. 2017;(5):25–27. URL: https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2017-05.pdf?ysclid=lpgkp9yw9r840350762 (accessed: 10.10.2023). (In Russ.).

6. Kharlamov AA, Komogortsev MG. Metod vizualizatsii i otsenki vibratsionnykh vozdeistvii na verkhnie stroeniya zheleznodorozhnogo puti. *Molodoi uchenyi.* 2011;3(26):88–91. URL: https://moluch.ru/archive/26/2816/?ysclid=lpgkuevag721587460 (accessed: 10.10.2023). (In Russ.).

7. Borisov EK, Alimov SG, Nazarov AYu. Vibratsiya grunta ot zheleznodorozhnogo trafika. *Vologdinskie chteniya.* 2005;48:87–92. (In Russ.).

8. Romanov SN. *Biologicheskoe deistvie vibratsii i zvuka: Paradoksy i problemy XX veka.* Vartanyan IA (ed.). Saint-Petersburg: Nauka; 1991. 158 p. URL: https://studizba.com/files/show/djvu/165-1-romanov--biologicheskoe-deystvie.html (accessed: 14.12.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 20.11.2023
Поступила после рецензирования 16.12.2023
Принята к публикации 22.12.2023

Об авторах:

Дмитрий Алексеевич Соколов, студент кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), SPIN-код: 3137-6710, ORCID, dmitriysokolov598@gmail.com

Елена Ивановна Головина, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности, заместитель декана по учебной работе факультета инженерных систем и сооружений Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), SPIN-код: 7333-2526, ORCID, u00111@vgasu.vrn.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д.А. Соколов — проведение эксперимента, анализ результатов исследований, подготовка и оформление текста статьи, формирование выводов.

Е.И. Головина — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.11.2023
Revised 16.12.2023
Accepted 22.12.2023

About the Authors:

Dmitriy A. Sokolov, Student of the Technosphere and Fire Safety Department, Voronezh State Technical University (84, 20 letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394006, RF), SPIN-код: 3137-6710, ORCID, dmitriysokolov598@gmail.com

Elena I. Golovina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technosphere and Fire Safety Department, Deputy Dean for Academic Affairs of the Faculty of Engineering Systems and Structures, Voronezh State Technical University (84, 20 letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394006, RF), SPIN-code: 7333-2526, ORCID, u00111@vgasu.vrn.ru

Claimed contributorship:

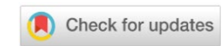
DA Sokolov: conducting an experiment, analyzing research results, preparing and formatting the text of the article, forming conclusions.

EI Golovina: academic advising, formulation of the basic concept, goals and objectives of the study.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 622.8
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72

Научная статья

Определение содержания серы в минеральной массе для прогноза опасных свойств угольных шахтопластов

Н.В. Пронская [1] , **Э.Н. Филатьева** [2] , **М.В. Филатьев** [2] , **Н.В. Шашло** [3]    
[1] Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Российская Федерация
[2] Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, Российская Федерация
[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ ninelllsss@gmail.com

EDN: WUYPWO

Аннотация
Введение. Сера присутствует в органической и минеральной части всех видов твердого топлива, причем от ее содержания зависит проявление опасных свойств шахтопластов. В связи с этим не теряют актуальность научные изыскания, связанные с определением количества серы в ископаемом топливе. Содержание общей серы и ее разновидностей изучалось в большинстве случаев с позиций эффективности процессов переработки топлива, качества и экологической безопасности угольной продукции. Меньше внимания уделяли проявлению опасных свойств шахтопластов, прогнозированию и разработке профилактических мероприятий по предотвращению эндогенных пожаров в угольных шахтах. Цель представленной работы — создание инженерного метода расчетного определения элементного содержания серы в минеральной массе углей для прогноза опасных свойств шахтопластов.
Материалы и методы. По результатам корреляционного анализа установили, каким образом содержание серы в горючей части топлива зависит от общей серы. Рассмотрели данные по углям практически всех шахтопластов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. Представили соотношения зольности пластовых и обогащенных проб, а также сведения о содержании общей серы и серы в горючей части. Это позволило расчетным путем оценить содержание серы в минеральных примесях. Исходные данные для разработки метода взяли из справочно-нормативных документов.
Результаты исследования. Рассмотрены семь совокупностей, которые включали от 149 до 1827 шахтопластов. По каждой обобщили справочные и расчетные данные:
– содержание серы — общей (S_t^d) и в горючей части топлива ($S_г$);
– условные точки для корректировки показателей во избежание получения отрицательных усредненных значений;
– эмпирические уравнения, которые описывают расчетные и скорректированные зависимости по соотношению S_t^d и $S_г$;
– корреляцию этих показателей;
– диапазоны изменения выхода золы.
Все эти сведения представлены для обогащенных и не обогащенных углей, для выхода золы более и менее 10 %. В одном случае отмечены удовлетворительные результаты определения расчетного содержания серы в условно негорючей массе. Это совокупность из 149 шахтопластов. Для 13 из них разность показателей ($S_t^d – S_г$) больше или равна нулю. Для 136 — меньше нуля. Для 81 содержание серы в условно негорючей части топлива $S_н$ меньше нуля. При этом отмечается достаточный уровень корреляции (0,79) и ограниченный диапазон изменения выхода золы (2,4–10). Соответствующее этой совокупности эмпирическое уравнение рекомендуется для прогноза опасных свойств шахтопластов с выходом золы менее 10 %.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты можно использовать для совершенствования нормативных документов по безопасному ведению горных работ с учетом содержания серы, как в органической массе, так и в минеральных примесях ископаемого угля.

Ключевые слова: сера в ископаемом угле, инженерный метод определения серы в минеральной массе угля, предотвращение эндогенных пожаров в угольных шахтах

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации по корректировке статьи.

Для цитирования. Пронская Н.В., Филатьева Э.Н., Филатьев М.В., Шашло Н.В. Определение содержания серы в минеральной массе для прогноза опасных свойств угольных шахтопластов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):58–72. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72

Original article

Determination of Sulfur Content in Mineral Mass for Prediction of Hazardous Properties of Coal Mine Seams

Natalya V. Pronskaya [1], Elvira N. Filatieva [2], Mikhail V. Filatiev [2], Nina V. Shashlo [3] ✉

[1] Donbass State Technical University, Alchevsk, Russian Federation
[2] Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ ninelllsss@gmail.com

Abstract

Introduction. Sulfur is found in the organic and mineral parts of all types of solid fuels, and its concentration determines the extent of the hazardous characteristics of mine seams. Therefore, research on the determination of sulfur content in fossil fuels has not lost its relevance. The total sulfur content and its varieties has been studied in most cases in terms of the efficiency of fuel processing processes, the quality and environmental safety of coal products. Less attention was paid to the hazardous properties of mine seams, forecasting and developing preventive measures for endogenous fires in coal mines. This work aims to develop an engineering method to calculate the elemental sulfur content in the mineral mass of coal to predict the hazardous properties of mine seams.

Materials and Methods. According to the results of the correlation analysis, we established how the sulfur content in the combustible part of the fuel depended on the total sulfur. We analyzed data on coals from almost all mine seams of the Donetsk and Lviv-Volyn coal basins. We presented the ash ratios for the formation and basin samples, as well as the information about the total sulfur and sulfur content in the combustible part. This allowed us to estimate the sulfur content in mineral impurities by calculation. The initial data for developing the method were taken from reference and regulatory documents.

Results. Seven sets were considered, which included from 149 to 1827 mine seams. For each, reference and calculation data were summarized:

– sulfur content — total (S_t^d) and in the combustible part of the fuel ($S_г$);
– conditional points for adjusting the indicators to avoid obtaining negative average values;
– empirical equations that describe the calculated and corrected dependencies based on the ratio of S_t^d and $S_г$;
– correlation of these indicators;
– ranges of change in ash yield.

All this information was presented for clean and raw coals, for ash yields of more and less than 10%. In one case, satisfactory results were noted for determining the calculated sulfur content in a conditionally non-combustible mass. This was a set of 149 mine layers. For 13 of them, the difference in indicators ($S_t^d - S_г$) was greater than or equal to zero. For 136 — less than zero. For 81, the sulfur content in the conditionally non-combustible part of the fuel $S_н$ was less than zero. At the same time, there was a sufficient level of correlation (0.79) and a limited range of changes in ash yield (2.4–10). The empirical equation corresponding to this set was recommended for predicting the hazardous properties of mine seams with an ash yield of less than 10%.

Discussion and Conclusion. The results of this study can be used to improve regulations for the safe conduct of mining activities, taking into account sulfur content in organic matter and in mineral impurities of fossil coal.

Keywords: sulfur in fossil coal, engineering method for determining sulfur in the mineral mass of coal, prevention of endogenous fires in coal mines

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewer for their professional analysis and recommendations for correcting the article.

For citation. Pronskaya NV, Filatieva EN, Filatiev MV, Shashlo NV. Determination of Sulfur Content in Mineral Mass for Prediction of Hazardous Properties of Coal Mine Seams. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):58–72. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72

Введение. Сера — элемент соединений, входящих в органическую и минеральную часть любого топлива. В минеральной массе углей сера встречается главным образом в виде сульфатов (в основном кальция и железа) и дисульфидов железа FeS_2 (пирита и марказита), в органической массе — в виде органических соединений.

Различают несколько основных форм серы в углях. Это части общей серы:

– сульфатная S_{SO_4} — входит в состав неорганической массы угля в виде сульфатов металлов;

– пиритная S_p — входит в состав неорганической массы угля в виде дисульфидов металлов (пирита и марказита);

– органическая S_o — входит в состав органических соединений.

Общую серу и ее разновидности, в отличие от серы золы, условно пересчитывают на элементную серу [1]:

$$S_t = S_{SO_4} + S_p + S_o\,. \qquad (1)$$

Содержание серы в золе принято рассчитывать в виде триоксида серы (SO_3). Сера — нежелательная и вредная часть топлива. При сжигании угля она выделяется в виде SO_2, загрязняет окружающую среду, вызывает коррозию металлических поверхностей, уменьшает теплоту сгорания топлива. При коксовании сера переходит в кокс, ухудшая его свойства и качество металла. По указанным причинам содержание общей серы и ее разновидностей изучалось в большинстве случаев с позиций эффективности процессов переработки топлива, качества и экологической безопасности угольной продукции. В этом направлении получены хорошие результаты, что подтверждается разработкой и успешным использованием современной промышленной классификации углей по генетическим и технологическим параметрам. В значительной степени она базируется на данных справочников, в которых по итогам экспериментов обобщалась информация о качестве каменных углей и антрацитов [2], а также об их обогатимости [3].

Менее значимы успехи в прогнозировании и разработке профилактических мероприятий по предотвращению эндогенных пожаров при ведении работ в угольных шахтах. Так, в течение двадцати лет (с 1994 по 2015 год), в шахтах Украины произошло более двухсот эндогенных пожаров [4]. Согласно открытым данным, аналогичные аварии происходят во многих угледобывающих странах. Таким образом, не решена проблема, актуальная с XIX века. Вначале она была связана с самовозгоранием угля на складах и при транспортировке, затем стали происходить аварии в угольных шахтах, обусловленные эндогенными пожарами [5].

Содержание серы в угле не только определяет его потребительские качества, но и существенно влияет на проявление опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ [6]. В частности, при увеличении содержания в угле общей серы на 1–6 % вероятность эндогенного пожара возрастает более чем в три раза [7]. Были попытки разобраться, как по минеральным примесям можно выявить опасные свойства угольных шахтопластов [8]. Однако и сейчас почти не известно, каким образом исследуемые риски зависят от вида и формы серы в ископаемом угле. В результате в нормативных документах[1,2] вероятность эндогенных пожаров в шахтопластах определялась только содержанием общей серы[3].

Исследования [5] показали, что самовозгорание в значительной мере обусловлено природой не только угля, но и сопровождающих пород[4]. Крайне важно установить составную часть топлива, от которой зависит вероятность самовозгорания. Без этого лабораторные методы исследований не дают приемлемых ответов на поставленные вопросы. Предполагалось наряду с лабораторными исследованиями угольного вещества учитывать наличие в ископаемом топливе углистой породы из минеральных пропластков, а также из пород кровли и почвы. Для этого необходимо дополнительно рассматривать выход золы и содержание всех видов серы [5].

В руководстве по предупреждению и тушению эндогенных пожаров[5], как и в других нормативных документах по безопасному ведению горных работ, не принимается во внимание наличие минеральных примесей. Они не учитываются при борьбе с пылью в угольных шахтах, прогнозах газовыделения[6] и внезапных выбросов[7] и в целом в нормативных документах, регламентирующих горные работы.

---

[1] *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* КД 12.01.402-2000 от 18.12.2000. Донецк: Научно-исследовательский институт горноспасательного дела; 2000. 216 с.

[2] *Каталог углей СССР, склонных к самовозгоранию.* Москва: Недра; 1982. 416 с.

[3] *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* КД 12.01.402-2000. Донецк: НИИГД; 2000. 216 с.

[4] ГОСТ 25543-2013. *Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам.* URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293772/4293772639.pdf (дата обращения: 11.01.2023).

[5] *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* КД 12.01.402-2000 от 18.12.2000. Донецк: Научно-исследовательский институт горноспасательного дела; 2000. 216 с.

[6] *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт.* Киев: Основа; 1994. 311 с.

[7] *Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ.* Стандарт Мінвуглепрому України № СОУ 10.1.00174088.011-2005. Київ: Мінвуглепром України; 2005. 224 с.

Содержание минеральных примесей, судя по выходу золы из пластовых проб угля [2] и [3], может значительно превышать 40 %. Это, несомненно, сказывается на достоверности прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ и указывает на актуальность совершенствования нормативной базы. Для этого необходимо разработать инженерный метод определения серы в минеральной массе углей.

Цель представленной работы — доказать принципиальную и практически единственную возможность расчетного определения элементного содержания серы в минеральной массе углей для прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ. Отметим, что при реализации данного подхода применяются некоторые стандартные показатели, зафиксированные в справочно-нормативной документации по потребительским качествам топлива для каждого шахтопласта. Речь идет об экспериментальных данных, касающихся содержания серы — общей и в горючей части топлива. Благодаря этим сведениям можно установить соотношения между содержанием серы в органической массе и минеральных примесях. По выходу золы можно определить соотношения между органической массой и минеральными примесями для обогащенных проб угля. Соотношение зольности пластовых и обогащенных проб дает возможность оценить содержание серы в удаляемых продуктах обогащения.

Материалы и методы. Методика проведения исследований основана на тесной корреляционной связи ($r = 0{,}93$) содержания серы в горючей части топлива ($S_г$) и обшей серы (S_t^d) для углей практически всех шахтопластов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов (рис. 1).

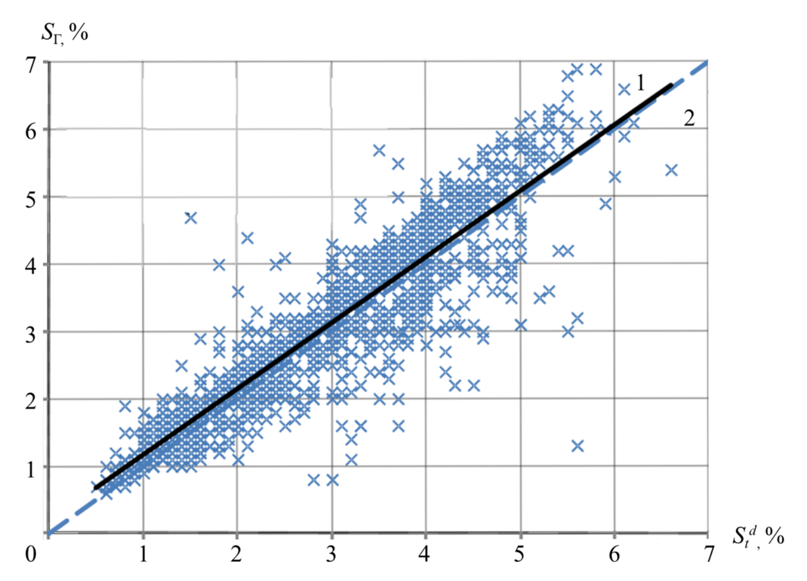


Рис. 1. Зависимость содержания серы в горючей части топлива ($S_г$) от общей серы (S_t^d) согласно статистической обработке экспериментальных данных: 1 — усредняющая прямая;
2 — биссектриса координатной сетки [2,3]

Статистическую обработку зависимости $S_г$ от S_t^d выполнили для 1827 шахтопластов, по которым известно содержание серы — общей и в горючей части топлива.

В справочном нормативном документе [3] указаны общие сведения о потребительских качествах углей для 734 шахтопластов, а в справочнике [2] — для 1379.

Близость усредняющей прямой 1 и биссектрисы 2 координатной сетки (рис. 1) показывает, что в общем случае содержание серы в горючей части топлива ($S_г$) может быть выше и ниже значения общей серы (S_t^d). Разница между S_t^d и $S_г$ ($S_t^d - S_г$) в первом приближении может быть критерием соотношения элементного содержания серы в горючей массе и в условно негорючей части топлива. Показатель ($S_t^d - S_г$) для 1315 шахтопластов был отрицательным, что указывает на преимущественное содержание серы в горючей части массы. Для 429 шахтопластов у этого показателя были положительные значения, что свидетельствует о преимущественном нахождении серы в условно негорючей части топлива. Нулевая разница ($S_t^d - S_г$) для 83 шахтопластов означала равенство содержания серы в горючей и условно негорючей частях углей для всей совокупности шахтопластов, рассматриваемых в статье.

Имеется информация для 2113 шахтопластов. По некоторым из них совпадают данные в разных документах, и это аргумент в пользу достоверности сведений. Для четырех шахтопластов не приведены значения выхода золы из пластовых проб (таблица 1). По этой причине можно анализировать экспериментальные данные о выходе золы для 2109 шахтопластов. Из них обогащение проводилось для 1622 шахтопластов, а для 487 не проводилось.

Таблица 1

Сведения о шахтопластах, для которых не приведены данные о выходе золы из пластовых проб

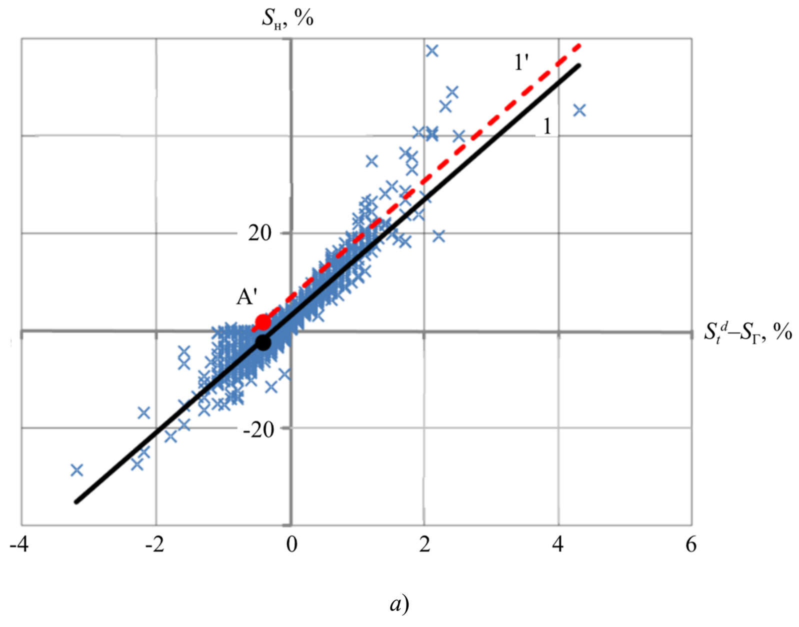
Источник	Страница источника	Шахта	Индекс пласта	Зольность, %		Содержание серы, %	
				пластовой пробы, $A_п^с$	обогащенной пробы, $A_о^с$	общей, S_t^d	в горючей части, $S_г$
[3]	74	№ 144	l_1	–	6,3	6,3	1,9
			k_8	–	6,1	2,8	3,0
		10-бис	m_3	–	7,0	3,2	3,5
[4]	106	Им. Войкова	l_2	–	–	–	–

Результаты исследования. Показатели из [2] и [3] позволили рассчитать для 1827 шахтопластов содержание серы в условно негорючей части топлива $S_н$:

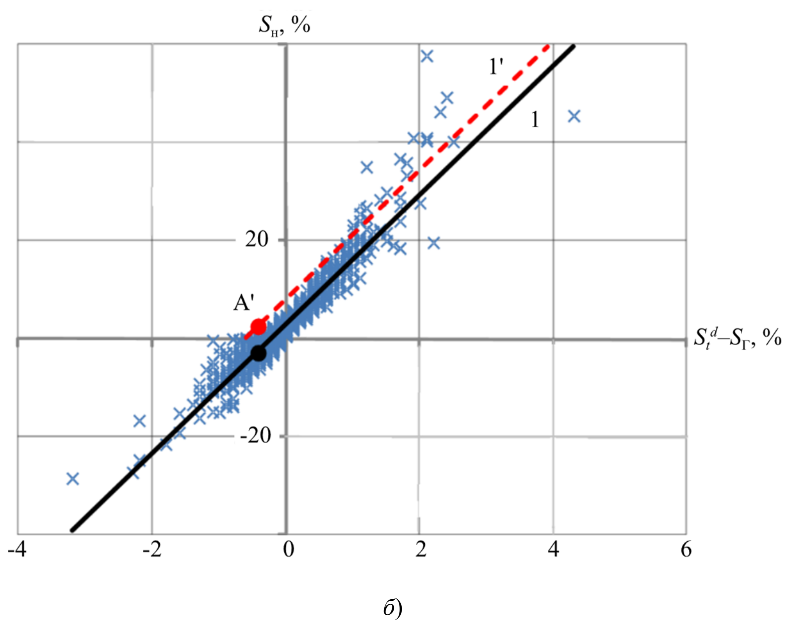
$$S_н = \frac{100 \cdot S_t^d - \left(100 - A_o^c\right) \cdot S_Г}{A_o^c}, \% \qquad (2)$$

где $A_о^с$ — выход золы из обогащенных проб, %.

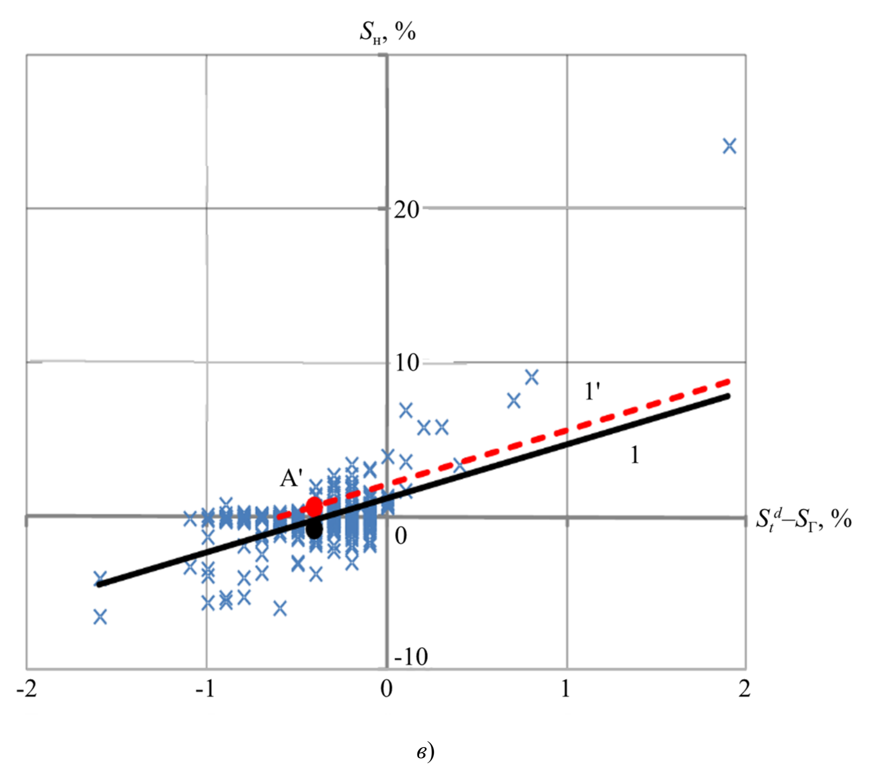
Расчетные значения $S_н$ связаны с показателем (S_t^d–$S_г$) тесной прямо пропорциональной корреляционной зависимостью (r = 0,91, рис. 2 *а*).



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимость от критерия ($S_t^d - S_г$) расчетных значений содержания серы ($S_н$) по уравнению (2) в условно негорючей части топлива: *а* — для всей совокупности из 1827 шахтопластов; *б* — для 1352 шахтопластов, угли которых предварительно обогащались; *в* — для 475 шахтопластов с необогащенными углями; 1 — усредняющие прямые; 1' — скорректированные положения усредняющих прямых; A' — условное нахождение точки для корректировки расположения прямой 1' и исключения получения отрицательных («диких») усредненных значений $S_н$; × — расчетные значения $S_н$ по уравнению (2) [3, 4]

Параллельно с этим получено значительное количество отрицательных расчетных значений $S_н$ для 802 шахтопластов. Тесная корреляция показателей и наличие «диких» (отрицательных) результатов свидетельствуют о возможном влиянии систематических погрешностей при определении разницы между содержанием серы общей (S_t^d) и в горючей части топлива ($S_г$). Наличие отрицательных расчетных значений $S_н$ может указывать на то, что систематические погрешности определения критерия ($S_t^d - S_г$) обусловлены как занижением экспериментальных значений общей серы, так и завышением в горючей части топлива.

Для раскрытия природы появления «диких» расчетных значений содержания серы в условно негорючей части топлива по уравнению (2) рассмотрели методики определения показателей, входящих в эту зависимость.

Известны несколько подходов к определению общей серы в углях — от классического гравиметрического метода Эшка до современных видов инструментального анализа [1]. Метод Эшка, предложенный в 1874 году, все еще широко используется в мировой практике. Он регламентируется ГОСТом[8]. Навеску угля сжигают путем спекания со смесью оксида магния и безводного углекислого натрия (соотношение 2:1 по массе) в окислительной атмосфере при температуре (800 ± 250) °С. Органическая масса топлива сгорает, и сера превращается в сульфаты натрия и магния. Их переводят в раствор. Сульфат-ион количественно осаждают в солянокислой среде хлористым барием в виде сернокислого бария $BaSO_4$. По массе $BaSO_4$ рассчитывают общее содержание серы. Недостатки этого подхода: большие затраты времени (не менее 6–7 часов) и возможность потери части органической серы при спекании со смесью [1]. В большинстве случаев метод применяется при возникновении разногласий как арбитражный. Общую серу в стандартных образцах топлива, предназначенных для градуировки анализаторов, определяют только методом Эшка.

Для практических целей рекомендуется регламентированный ГОСТом[9] ускоренный стандартный метод определения общей серы. Навеска топлива сжигается в потоке кислорода или воздуха в трубчатой печи при 1350 °С. Образуются зольный остаток и газообразные продукты сжигания, в состав которых входят оксиды серы (в основном SO_2) и хлора. Анализ выполняется за 40–60 минут. Этот метод использовали при определении

[8] *Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ.* Стандарт Мінвуглепрому України СОУ 10.1.00174088.011-2005. Київ: Мінвуглепром України; 2005. 224 с.

[9] ГОСТ 2059-95 (ИСО 351-96). *Топливо твердое минеральное. Метод определения общей серы сжиганием при высокой температуре.* Москва: Стандартинформ; 2008. 14 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294832/4294832840.pdf (дата обращения: 11.11.2023).

содержания общей серы для установления потребительских качеств углей, экспериментальные значения приведены в справочно-нормативных документах [2, 3]. Ускоренный метод определения общей серы рекомендуется для контроля за содержанием серы в малозольных топливах. Его нежелательно использовать при анализе высокозольных топлив со значительным содержанием соединений кальция. Из-за разнообразия состава минеральной массы и соединений серы нельзя быть полностью уверенным в том, что часть серы не останется в золе в виде $CaSO_4$. Как следствие, результаты получаются заниженными [1].

Для большинства шахтопластов после обогащения угля выход золы составляет менее 10 %, но этот показатель бывает и значительно выше (рис. 3).

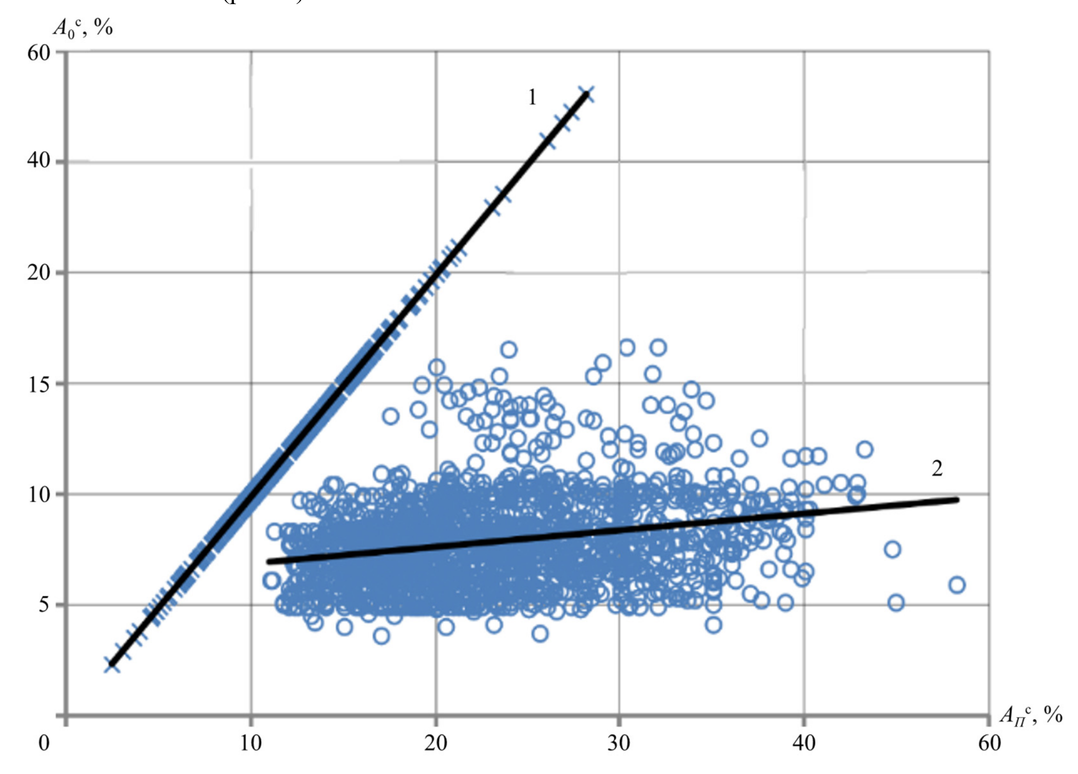


Рис. 3. Зависимость выхода золы из обогащенных проб угля ($A_о^с$) от выхода золы из пластовых проб ($A_п^с$) согласно экспериментальным данным [2, 3]

По этой причине даже после обогащения значительной части проб нет оснований считать все угли малозольными. Для 487 шахтопластов, согласно данным [2, 3], обогащение не проводилось и выход золы во многих случаях превышал 10 %, что также не позволяет относить угли этой совокупности шахтопластов к малозольным.

Соединения кальция есть в минеральных примесях углей всех шахтопластов. Об этом свидетельствует типизация состава зол (таблица 2), согласно которой содержание CaO в общем случае может достигать 40 %.

Таблица 2

Типизация состава зол углей по данным [2] и [3]

Типы зол углей	Пределы колебания состава, %			
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO
Кремнистые	8–30	40–70	до 20	до 20
Глиноземные	30–45	40–55	до 20	до 20
Железистые	10–20	30–55	> 20	до 20
Известковые	5–20	15–40	5–20	20–40

Одна из причин получения «диких» расчетных значений $S_н$ по уравнению (2) — занижение S_t^d при определении ускоренным методом. Такой вывод обосновывается:

– анализом выхода золы из обогащенных и пластовых проб;

– возможным содержанием соединений кальция во всех типах зол.

Второй фактор получения отрицательных расчетных значений $S_н$ — завышение доли горючей части топлива с использованием в качестве множителя (100–$A_о^c$) в уравнении (2). Содержание общей серы S_t^d относится как к органической части, так и к минеральной массе (ММ) топлива. По этой причине более логичным было бы

использовать в уравнении (2) вместо выхода золы $A_о^c$ значений ММ, которые для рассматриваемых шахтопластов экспериментально не определялись. Согласно известным эмпирическим зависимостям, значения ММ всегда превышают выход золы на сухое состояние. Учет такого превышения требует дополнительных (недостающих) сведений о гидратной влаге, выделяющемся диоксиде углерода при полном разложении карбонатов, пиритной и сульфатной сере. Для приблизительной оценки содержания минеральной массы иногда используют соотношение ММ ≈ 1,1 $A_о^c$ [1].

Анализ показал причины систематического занижения произведения $100 \cdot S_t^d$ и завышения разности $(100–A_о^c)\ S_г$ при определении расчетных значений $S_н$ по уравнению (2).

Наличие отрицательных значений $S_н$ для совокупности из 802 шахтопластов (рис. 2 *а*) дает возможность оценить среднее занижение критерия $\overline{S_t^d - S_г}$, при котором получены «дикие» результаты:

$$\overline{S_t^d - S_г} = \frac{\sum_i^n \left(S_t^d - S_г\right)_i}{n} = \frac{-336,3}{802} = -0,42,\ \% \tag{3}$$

Здесь $n = 802$ — количество шахтопластов, для которых получены отрицательные значения $S_н$; $\Sigma\left(S_t^d - S_г\right)_i$ — сумма отрицательных значений $S_t^d – S_г$ для совокупности из $n = 802$ шахтопластов.

Среднему отрицательному значению $\overline{S_t^d - S_г} = -\,0,42\%$ соответствует среднее отрицательное значение $\overline{S_н}$:

$$\overline{S_н} = \frac{\sum_i^n S_{нi}}{n} = \frac{-1682,18}{802} = -2,10,\ \%, \tag{4}$$

где $\sum_i^n S_{нi}$ — сумма отрицательных расчетных значений $S_н$ для совокупности из $n = 802$ шахтопластов.

Чтобы исключить получение отрицательных усредненных значений $S_н$, необходимо положение прямой 1 (рис. 2 *а*) скорректировать с учетом координат $\overline{S_t^d - S_г} = -0,42\ \%$ и $\overline{S_н} = -2,10\ \%$. Скорректированная прямая 1' должна проходить не ниже точки А' с координатами $\overline{S_t^d - S_г} = -0,42\ \%$ и $\overline{S_н} = +2,10\ \%$. Прямо пропорциональная зависимость $S_н$ от $(S_t^d – S_г)$ $(r = 0,91)$ указывает на то, что истинное положение скорректированной прямой 1' будет близко к ее параллельности с прямой 1. Использование в инженерных расчетах значений $S_н'$, определенных по уравнению 1' (рис. 2 *а*), гарантирует, как минимум, отсутствие их отрицательных усредненных значений.

Эмпирическое уравнение 1' получено на основании экспериментальных данных для 1827 шахтопластов. Из них для проб углей 1352 шахтопластов проводилось предварительное обогащение. Выход золы из пластовых проб углей остальных 475 шахтопластов был несколько ниже, поэтому для них обогащение не предусматривалось.

Предварительное обогащение существенно повлияло на выход золы по сравнению с необогащенными пробами (рис. 3). Следовало выяснить, как точность расчетного определения серы по уравнению (2) в условно негорючей части топлива зависит от обогащения. Для этого рассмотрели отдельные характерные совокупности шахтопластов. К одной совокупности из 1352 вариант отнесли шахтопласты, угли которых подвергались предварительному обогащению (рис. 2 *б*). До обогащения выход золы из пластовых проб составлял 11,0–48,2 %, а после — 3,7–16,7 % (рис. 3).

Во второй совокупности из 475 вариант рассмотрели шахтопласты, угли которых предварительно не обогащались (рис. 2 *в*), так как условно их относили к малозольным. Выход же золы из необогащенных углей этой совокупности шахтопластов колебался от 2,4 % до 28,1 % (рис. 3).

Выход золы для обеих рассматриваемых совокупностей шахтопластов во многих случаях значительно превышал 10 %. Диапазоны выхода составляли 3,7–16,7 % и 2,4–28,1 % соответственно. Это указывает на отсутствие в ряде случаев для обеих совокупностей обоснованного применения альтернативного ускоренного стандартного метода определения общей серы S_t^d [9]. В результате по большинству рассматриваемых шахтопластов расчетные значения S_t^d оказались заниженными. Вследствие этого получены и «дикие», рассчитанные по уравнению (2), значения $S_н$ соответственно для 558 и 244 шахтопластов обеих (2-й и 3-й) совокупностей (таблица 3).

Таблица 3

Сводные результаты определения расчетных значений $S_н$ согласно статистической обработке экспериментальных данных для разных совокупностей шахтопластов

№	Количество шахтопластов				Координаты точек A', %		Эмпирические уравнения	Корреляция		Диапазон изменения выхода золы, %	Пояснение
	$S_н<0$	$S_t^d - S_г < 0$	$S_t^d - S_г \geq 0$	общее	$\overline{S_t^d - S_г}$	$\overline{S_н}$		σ, %	r		
1	1827	512	1315	802	–0,42	2,1	$S_н^* = 11{,}97\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}34$	0,91	2,67	2,4–48,2	Вся совокупность шахтопластов с обогащенными и не обогащенными углями
							$S_н'^{**} = 11{,}97\left(S_t^d - S_г\right) + 7{,}12$	–	–		
2	1352	491	861	558	–0,42	2,69	$S_н = 13{,}15\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}11$	0,94	2,43	3,7–16,7	Обогащение проводилось
							$S_н' = 13{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 8{,}21$	–	–		
3	475	21	454	244	–0,41	0,71	$S_н = 3{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}24$	0,56	1,5	2,4–28,1	Шахтопласты с предположительно низкозольными углями
							$S_н' = 3{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 2{,}15$	–	–		
4	1181	452	729	487	–0,41	2,88	$S_н = 13{,}84\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}00$	0,95	2,28	3,7–10	Обогащенные угли с выходом золы менее 10 %
							$S_н' = 13{,}84\left(S_t^d - S_г\right) + 8{,}55$	–	–		
5	171	39	132	71	–0,50	1,36	$S_н = 7{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 2{,}84$	0,92	1,47	10,1–16,7	Выход золы после обогащения более 10 %
							$S_н' = 7{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 5{,}11$	–	–		
6	149	13	136	81	–0,26	1,13	$S_н = 8{,}27\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}57$	0,79	1,61	2,4–10	Выход золы из необогащенных проб менее 10 %
							$S_н' = 8{,}27\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}28$	–	–		
7	326	8	318	163	–0,48	0,5	$S_н = 2{,}53\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}13$	0,56	1,04	10,1–28,1	Выход золы из пластовых необогащенных проб более 10 %
							$S_н' = 2{,}53\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}71$	–	–		

Примечания. В первом столбце № — номер совокупности пластов; * — зависимости согласно расчетным значениям $S_н$ по уравнению (2) и экспериментальным данным критерия ($S_t^d - S_г$); ** — скорректированные зависимости $S_н'$; σ — среднеквадратическое отклонение.

Средние отрицательные значения $S_t^d - S$ для шахтопластов 2-й и 3-й совокупностей были рассчитаны по уравнению (3). Они равнялись соответственно –0,42 % и –0,41 %. Это указывает на практически одинаковые средние погрешности занижения расчетного содержания общей серы альтернативным ускоренным методом для обеих совокупностей при расчете $S_н$ по уравнению (2). По указанным обстоятельствам ускоренный метод определения обшей серы и возможные занижения ее истинных значений не относятся к различиям между 2-й и 3-й совокупностями шахтопластов.

Логика уравнения (2) показывает, что разные расчетные значения $S_н$ 2-й и 3-й совокупностей можно получить только с учетом разного выхода золы из обогащенных и пластовых проб углей. Для удобства анализа потенциального влияния выхода золы из обогащенных и необогащенных проб углей уравнение (2) представили в виде слагаемых.

Для обогащенных проб (совокупность 2):

$$S_н^o = \frac{100}{A_с^o} \cdot S_t^d - \frac{100}{A_с^o} \cdot S_г^o + S_г^o, \%. \quad (5)$$

Для необогащенных пластовых проб (совокупность 3):

$$S_н^п = \frac{100}{A_п^с} \cdot S_t^d - \frac{100}{A_п^с} \cdot S_г^п + S_г^п, \%. \quad (6)$$

Сравнивая слагаемые уравнений (5) и (6), определили направленность их влияния на расчетные значения $S_н$. Первое слагаемое $\left(100/A_с^o\right) \cdot S_t^d$ уравнения (5) заведомо больше аналогичного слагаемого $\left(100/A_п^с\right) \cdot S_t^d$ уравнения (6). Это определили по бесспорному превышению выхода золы из пластовых проб по сравнению с выходом из обогащенных ($A_п^с > A_о^с$). Неравенство позволяет утверждать, что значения общей серы, определенные ускоренным альтернативным методом, будут в большей степени занижаться для пластовых проб. По этой причине значения S_t^d уравнения (5), как минимум, не меньше, чем в (6).

Вторые слагаемые со знаком минус уравнений (5) и (6) $\left(\left(100/A_о^с\right) \cdot S_г^о \text{ и } \left(100/A_п^с\right) \cdot S_г^п\right)$ характеризуют увеличение доли содержания серы в горючей части топлива после обогащения углей по сравнению с содержанием в пластовых пробах до обогащения. Под воздействием процессов обогащения выход золы сокращается в несколько раз ($A_о^c < A_п^c$, рис. 3). В результате увеличивается доля горючей части топлива обогащенных углей $\left(100/A_с^o\right)$ по сравнению с ее долей в пластовых пробах $\left(100/A_п^с\right)$. Это, а также устойчивость соединений серы обусловливают рост относительного (процентного) содержания серы $S_г^о$ в горючей части топлива после обогащения. Эти значения всегда превышают процентное содержание серы в пластовых необогащенных пробах, т. е. соблюдается неравенство $S_г > S_г^п$. Отрицательные слагаемые уравнений (5) и (6) $\left(\left(100/A_о^с\right) \cdot S_г^о \text{ и } \left(100/A_п^с\right) \cdot S_г^п\right)$ при любом их соотношении составляют лишь некоторую часть от содержания серы в горючей массе. Вследствие этого суммарные значения второго и третьего слагаемых уравнений (5) и (6) будут положительными.

Рассмотрим неравенство слагаемых в (5) и (6): $S_г^о > S_г^п$ и $\left(100/A_о^с\right) \cdot S_t^d$ и $\left(100/A_п^с\right) \cdot S_t^d$. Это говорит о том, что обогащение ведет к процентному увеличению содержания серы в негорючей части топлива ($S_н$) и ее тесной, почти функциональной корреляционной зависимости ($r = 0{,}94$) от критерия $S_t^d – S_г$ (рис. 2 *б*). Сильная корреляция $S_н$ и $S_t^d – S_г$ для обогащенных углей шахтопластов 2-й совокупности обусловлена значительным принудительным сокращением содержания условно негорючих (минеральных) примесей. Об этом говорит сокращение диапазона выхода золы из пластовых необогащенных проб с 11,0–48,2 % до 3,7–16,7 % после обогащения. Для рассматриваемой совокупности шахтопластов в большинстве случаев (около 90 %) выход золы составлял менее 10 %, что указывает на незначительную долю содержания минеральных примесей в углях после обогащения. Обогащением в значительной степени объясняется приближение массовой доли горючей части топлива к органической массе. Корреляционная зависимость 1 (рис. 2 *б*) относится к незначительной доле (менее 10 %) сохранившихся после обогащения минеральных (условно негорючих) примесей. Относительно высокий коэффициент регрессии уравнения 1 (13,15) указывает на диспропорцию показателей:

– сокращения выхода золы после обогащения углей;

– содержания серы в сохранившейся части условно негорючих (минеральных) примесей [10].

Как видно из уравнения (5), высокая корреляционная зависимость $S_н$ от показателя $S_t^d – S_г$ для шахтопластов 2-й совокупности обеспечивалась относительным постоянством выхода золы $A_о^c$ для большинства шахтопластов в пределах 3,7–10,0 %. Это фактически исключает существенное влияние непредсказуемых колебаний доли условно негорючих (минеральных) примесей в более широких диапазонах. Значения $S_н^о$ для 2-й совокупности шахтопластов, рассчитанные по уравнению (5), определяются экспериментальными данными S_t^d и $S_г^о$. Это подтвердили результаты статистической обработки (рис. 2 *б*). Влияние колебаний выхода золы $A_о^c$ после обогащения углей свелось до минимума, и расчетные значения $S_н^о$ в большей степени зависели от двух показателей — S_t^d и $S_г^о$.

Такой устойчивой связи между $S_н$ и ($S_t^d – S_г$) не наблюдается при отсутствии процессов обогащения (рис. 2 *в*). Это выразилось в более низком коэффициенте корреляции ($r = 0,56$) и снижении коэффициентов регрессии эмпирических уравнений 1 с 13,15 (рис. 2 *б*) до 3,50 (рис. 2 *в*).

При расчете значений $S_н^п$ по уравнению (6) для 3-й совокупности шахтопластов диапазон непредсказуемых колебаний значений выхода золы $A_п^c$ расширился до 2,4 %–28,1 %. Это значительно больше, чем при стабильном выходе золы из обогащенных проб углей 2-й совокупности. Отметим усиление влияния дополнительного фактора, связанного с существенными колебаниями выхода золы из пластовых проб в более широких интервалах. Это привело к ослаблению корреляционной зависимости 1 до значения $r = 0,56$ (рис. 2 *в*).

Подавляющее большинство углей 3-й совокупности шахтопластов по критерию $S_t^d – S_г < 0$ должно относиться к малозольным. Из 475 шахтопластов всей рассматриваемой совокупности для 454 (т. е. для 95,6 %) значения критерия были отрицательными. По отрицательным значениям критерия $S_t^d – S_г$ основное процентное содержание серы необходимо было условно отнести к горючей массе углей этих шахтопластов. Определение $S_н$ согласно уравнению (6) для 244 шахтопластов дало «дикие» значения. Для остальных 231 шахтопласта расчетные значения $S_н$ были положительными (210 вариант) или равнялись нулю (21 варианта). Исследование выявило примерно равное количество околонулевых расчетных значений $S_н$. Это подтверждает наличие систематических погрешностей экспериментально определенных параметров, входящих в (6). Доказательством служит также примерное равенство по абсолютной величине средних отрицательных (–0,71 %) и средних положительных (+0,80 %) расчетных значений $S_н$. Это дает возможность обоснованно вносить количественные корректировки в расчеты, чтобы исключить получение «диких» результатов.

Сравнение расчетных значений содержания серы в негорючей части топлива для 2-й и 3-й совокупностей демонстрирует значительное отличие исходных параметров показателей, которые использовались при определении $S_н$ и $S_н^п$ по уравнениям (5) и (6) соответственно. Основная разница обусловлена предварительным обогащением углей 2-й совокупности. Обогащение непропорционально изменило соотношение выхода золы и содержания серы в горючей части топлива. Исходные соотношения формировались в природных условиях и связаны с индивидуальной геологической историей образования каждого шахтопласта, а именно:

– последовательным накоплением осадков;

– погружением и преобразованием исходного вещества на предшествующих метаморфизму стадиях торфообразования и диагенеза.

В углях 3-й совокупности шахтопластов сохранились исходные сложившиеся природные соотношения между выходом золы из пластовых проб, содержанием общей серы и некоторой ее части в горючей массе топлива.

Обогащение углей 2-й совокупности шахтопластов и сокращение выхода золы (в большинстве случаев ниже 10 %) предопределили искусственную близость всей совокупности по содержанию минеральных (условно негорючих) примесей. В результате фактического устранения влияния выхода золы из обогащенных проб для большинства шахтопластов по уравнению (5) получены расчетные значения $S_н^п$, которые в значительной степени непосредственно связаны с критерием ($S_t^d – S_г$). Это и предопределило их высокую корреляционную взаимозависимость (рис. 2 *б*).

Главное отличие углей 2-й и 3-й совокупностей шахтопластов — значения выхода золы из обогащенных и пластовых проб углей. Для детального представления о влиянии выхода золы из обогащенных и необогащенных проб углей на расчетные значения $S_н$ дополнительно рассмотрели четыре совокупности шахтопластов с углями разной степени глубины обогащения (рис. 4).

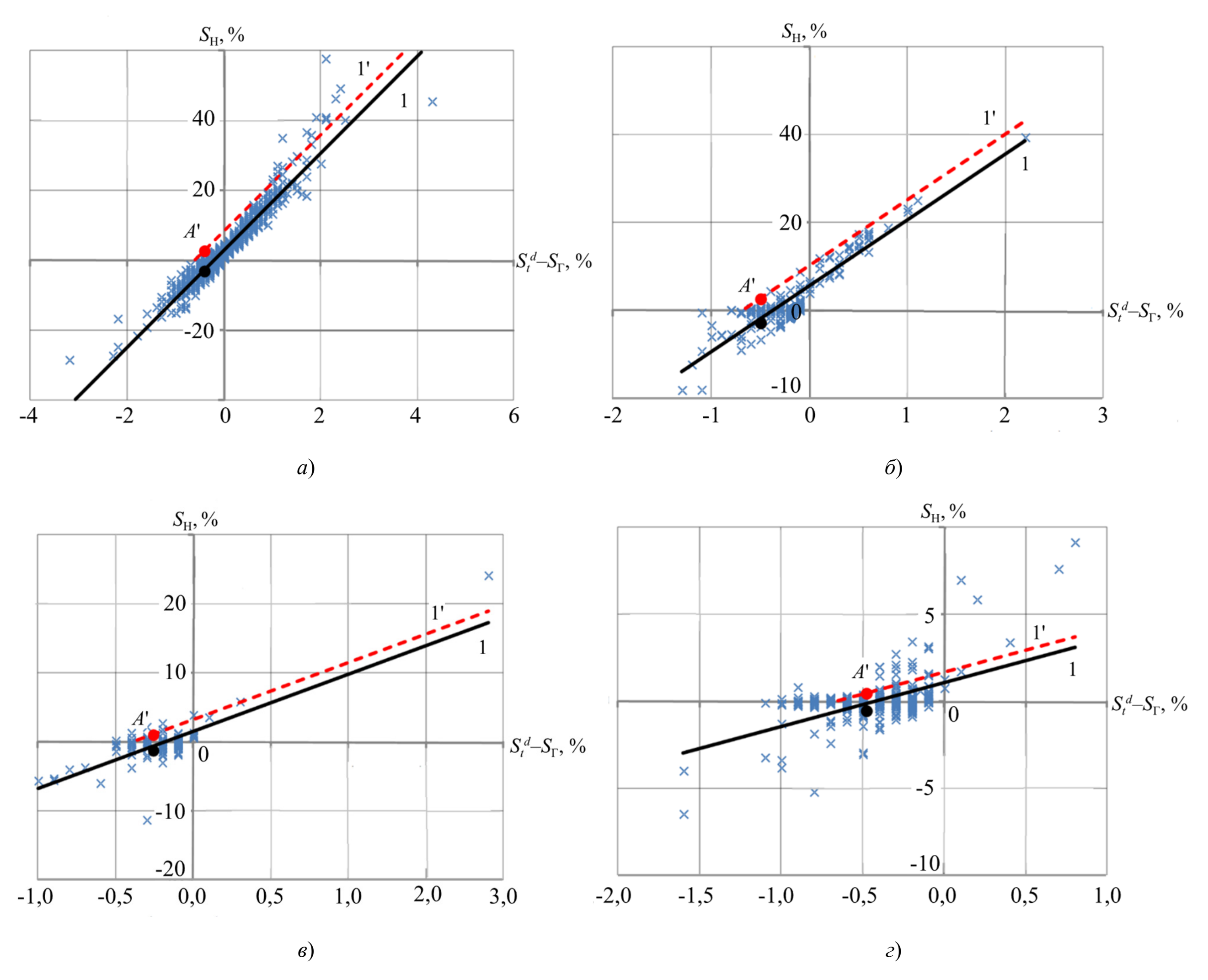


Рис. 4. Зависимость расчетных значений содержания серы ($S_н$) в условно негорючей части топлива от критерия ($S_t^d – S_г$) [2, 3]

По выходу золы из обогащенных проб шахтопласты разделили на две группы: менее 10 % и более 10 % (рис. 3). Рассмотрели соответствующие группам совокупности — 4-ю (рис. 4 *а*) и 5-ю (рис. 4 *б*).

Большинство шахтопластов (1181 % или 87,4 %) по выходу золы менее 10 % из обогащенных проб отнесли к 4-й совокупности. В 5-й совокупности шахтопластов с выходом золы более 10 % рассмотрели расчетные значения $S_н$ для 171 шахтопласта, что составило 12,6 % от общего количества шахтопластов (1352), угли которых обогащались.

Для обеих совокупностей шахтопластов после обогащения получены тесные прямо пропорциональные корреляционные зависимости расчетных значений $S_н$ от критерия $S_t^d – S_г$. Коэффициенты корреляции — 0,95 и 0,92 соответственно. Коэффициенты регрессии этих зависимостей (рис. 4 *а*, *б*) равнялись 13,84 и 7,50 соответственно. Почти двукратная разница между эмпирическими коэффициентами регрессии свидетельствует о существенных различиях между углями 4-й и 5-й совокупностей. Ее можно объяснить:

– количественным и качественным составом минеральных примесей в пластовых пробах;

– разной эффективностью обогащения.

Влияние указанных факторов требует отдельного детального исследования [11].

Аналогичные совокупности шахтопластов сформировали по выходу золы из пластовых (необогащенных) проб менее и более 10 %. Для 6-й совокупности из 149 шахтопластов установили зависимость $S_н$ от критерия $S_t^d – S_г$ при выходе золы из необогащенных (пластовых) проб менее 10 % (рис. 4 *в*). В 7-й совокупности из 326 шахтопластов рассмотрели аналогичные зависимости расчетных значений $S_н$ от критерия ($S_t^d – S_г$) при выходе золы более 10 % (рис. 4 *г*).

Полученные прямо пропорциональные эмпирические зависимости для 6-й и 7-й совокупностей шахтопластов с разным выходом золы из необогащенных (пластовых) проб значительно различаются. Отличия обусловлены как теснотой корреляционных связей, так и коэффициентами регрессии эмпирических уравнений.

Выход золы из необогащенных (пластовых) проб менее 10 % указывает на низкую зольность углей 6-й совокупности шахтопластов. В этом случае корреляционная связь довольно высока ($r = 0{,}79$). Для более зольных углей 7-й совокупности шахтопластов корреляция значительно слабее ($r = 0{,}56$).

Более чем в три раза различаются коэффициенты регрессии эмпирических уравнений 6-й и 7-й совокупности шахтопластов. Они соответственно равны 8,27 (рис. 4 *в*) и 2,53 (рис. 4 *г*).

Выявленные существенные отличия между эмпирическими зависимостями 6-й и 7-й совокупностей шахтопластов по тесноте корреляционных связей и коэффициентов регрессии указывают на разные особенности условий накопления серы в минеральной (условно негорючей) части топлива для углей с разным уровнем выхода золы.

Низкий уровень выхода золы (менее 10 %) свидетельствует о незначительном содержании минеральных примесей. Между расчетным содержанием серы в условно негорючей части и критерием ($S_t^d - S_г$) (рис. 4 *в*) фиксируется довольно высокий коэффициент корреляции ($r = 0{,}79$). Это значит, что сера формировалась параллельно в минеральных примесях и в органической массе на разных стадиях образования угля. Отсутствие такой тесной корреляции для высокозольных углей указывает на разные условия формирования содержания серы в минеральных примесях и в органической массе 7-й совокупности шахтопластов (рис. 4 *г*).

Обсуждение и заключение. Согласно эмпирическим уравнениям (рис. 4) попарно рассмотрели совокупности шахтопластов, которые при прочих равных условиях отличались по двум факторам (таблица 3):

– обогащались или не обогащались угли;

– выход золы из обогащенных или необогащенных углей был менее или более 10 %.

Обогащение существенно меняет соотношения между:

– органической массой и минеральными примесями;

– горючими и условно негорючими частями топлива.

По этой причине 1-я, 2-я, 4-я и 5-я совокупности шахтопластов и соответствующие им эмпирические уравнения не отражают истинное природное содержание серы в негорючих частях ископаемых углей. Их нельзя использовать для прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ.

Содержание серы в условно негорючей массе необогащенных проб для 3-й и 7-й совокупностей занижается из-за наличия высокого выхода золы и применения альтернативного стандартного метода определения содержания общей серы. Область применения соответствующих этим совокупностям эмпирических уравнений ограничена шахтопластами с низкозольными углями и незначительным содержанием соединений кальция в минеральных примесях.

Наиболее достоверные результаты определения расчетного содержания серы в условно негорючей массе получены для 6-й совокупности шахтопластов. Практическое применение соответствующего эмпирического уравнения рекомендуется при прогнозе опасных свойств шахтопластов с выходом золы менее 10 %.

Можно улучшить предложенный метод определения серы в минеральных примесях и расширить область его применения. Для этого необходимо установить соотношения:

– содержания серы в органической и горючей массе углей;

– минеральных примесей и выхода золы (с определением ее химического состава).

Результаты таких исследований можно использовать для совершенствования нормативов по безопасному ведению горных работ с учетом содержания серы как в органической массе, так и в минеральных примесях ископаемых углей.

Список литературы

1. Авгушевич И.В, Сидорук Е.И., Броновец Т.М. *Стандартные методы испытания углей. Классификации углей.* Москва: Реклама мастер; 2019. 576 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-standmethodsoftestcoalsavg2019.pdf (дата обращения: 11.11.2023).

2. Двужильная Н.М., Егоркина В.М. *Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов.* Москва: Недра; 1972. 168 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1URCq6AD_ArlW8cV0Y2X35FYSl4_LSD5A/view (дата обращения: 11.07.2023).

3. Коткин А.М., Ельяшевич М.Г. (ред.). *Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УССР, Львовско-Волынский бассейн)*. Т. 1. Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР. Москва: Недра; 1965. 204 с.

4. Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность. *Уголь Украины.* 2014;(10):46–50.

5. Стадников Г.Л. *Самовозгорающиеся угли и породы, их геохимическая характеристика и методы опознавания.* Москва: Углетехиздат; 1956. 478 с.

6. Руднєв Є.С, Гальченко В.А., Філатьєва Е.М., Антощенко М.І. Сірка у викопному вугіллі як фактор прояву небезпечних властивостей шахтопластів. В: *Збірник наукових праць.* Вісник Криворізького національного університету; 2021. С. 21–28.

7. Греков С.П., Всякий А.А. Влияние содержания серы в углях на вероятность их самовозгорания. *Уголь Украины.* 2014;(4):18–21.

8. Руднєв Є.С, Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Романченко Ю.А. Про вплив мінеральних домішок на виявлення небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Вісті Донецького гірничого інституту.* 2021;2(49):85–95. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95

9. Буковская М., Буковский П. Изменение свойств углепородного массива и возникновение опасных природных явлений при затоплении выработок закрытых угольных шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* 2021;(5):56–70. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210506

10. Meng Wu, Jian Shen, Yunhu Qin, Yong Qin, Xiaoqing Wang, Shifei Zhu. Method of identifying total sulfur content in coal: geochemical and geophysical logging data from the Upper Paleozoic in North China. *ACS Omega.* 2022;7(49):45045–45056. https://doi.org/10.1021%2Facsomega.2c05459

11. Anubhav Shukla, Anup Krishna Prasad, Sameeksha Mishra, Arya Vinod, Atul K Varma. Rapid estimation of sulfur content in high-ash Indian coal using mid-infrared FTIR data. *Minerals.* 2023;13(5):634. https://doi.org/10.3390/min13050634

References

1. Avgushevich IV, Sidoruk EI, Bronovets TM. *Standartnye metody ispytaniya uglei. Klassifikatsii uglei.* Moscow: Reklama master; 2019. 576 p. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-standmethodsoftestcoalsavg2019.pdf (accessed: 11.11.2023). (In Russ.).

2. Dvuzhilnaya NM, Egorkina VM. *Spravochnik po kachestvu kamennykh uglei i antratsitov Donetskogo i L'vovsko-Volynskogo basseinov.* Moscow: Nedra; 1972. 168 p. URL: https://drive.google.com/file/d/1URCq6AD_ArlW8-cV0Y2X35FYSl4_LSD5A/view (accessed: 11.07.2023). (In Russ.).

3. Kotkin AM, Elyashevich MG. (ed.). *Spravochnik po kachestvu i obogatimosti kamennykh uglei i antratsitov Ukrainskoi SSR (Donbass v granitsakh USSR, L'vovsko-Volynskii bassein)*. Vol. 1. Kharakteristika kachestva kamennykh uglei i antratsitov Ukrainskoi SSR. Moscow: Nedra; 1965. 204 p. (In Russ.).

4. Grekov SP, Pashkovskii PS, Orlikova VP. Teplovoi effekt okisleniya uglei i endogennaya pozharoopasnost'. *Ugol' Ukrainy.* 2014;(10):46–50. (In Russ.).

5. Stadnikov GL. *Samovozgorayushchiesya ugli i porody, ikh geokhimicheskaya kharakteristika i metody opoznavaniya.* Moscow: Ugletekhizdat; 1956. 478 p. (In Russ.).

6. Rudniev YES, Halchenko VA, Filatieva EM, Antoshchenko MI. Cirka u vykopnomu vuhilli yak faktor proiavu nebezpechnykh vlastyvostei shakhtoplastiv. In: *Zbirnyk naukovykh prats. Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*; 2021. P. 21–28. (In Ukr.)

7. Grekov SP, Vsyakii AA. Vliyanie soderzhaniya sery v uglyakh na veroyatnost' ikh samovozgoraniya. *Ugol' Ukrainy.* 2014;(4):18–21. (In Russ.).

8. Rudniev YES, Antoshchenko MI, Filatieva EM, Romanchenko YUA. Pro vplyv mineralnykh domishok na vyiavlennia nebezpechnykh vlastyvostei vuhilnykh shakhtoplastiv. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu.* 2021;2(49):85–95. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95

9. Bukowska M, Bukowski P. Changes of properties of carboniferous rock mass and the occurrence of some natural hazards in the conditions of flooding of roadways within abandoned coal mines. *Journal of Mining Sciences.* 2021;(5): 56–70. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210506 (In Russ.).

10. Meng Wu, Jian Shen, Yunhu Qin, Yong Qin, Xiaoqing Wang, Shifei Zhu. Method of identifying total sulfur content in coal: geochemical and geophysical logging data from the Upper Paleozoic in North China. *ACS Omega.* 2022;7(49):45045–45056. https://doi.org/10.1021%2Facsomega.2c05459

11. Anubhav Shukla, Anup Krishna Prasad, Sameeksha Mishra, Arya Vinod, Atul K Varma. Rapid estimation of sulfur content in high-ash Indian coal using mid-infrared FTIR data. *Minerals.* 2023;13(5):634. https://doi.org/10.3390/min13050634

Поступила в редакцию 29.11.2023
Поступила после рецензирования 18.12.2023
Принята к публикации 29.12.2023

Об авторах

Наталья Викторовна Пронская, ассистент кафедры маркшейдерии, геодезии и геологии Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), ORCID, doctressa@mail.ru

Эльвира Николаевна Филатьева, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, РФ, г. Луганск, квартал Молодежный, 20а), ORCID, Elafilatyeva@gmail.com

Михаил Владимирович Филатьев, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, РФ, г. Луганск, квартал Молодежный, 20а), ORCID, Mfilatev@gmail.com

Нина Владимировна Шашло, кандидат экономических наук, начальник отдела ядерной программы управления трансформации образования, доцент кафедры медиатехнологии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, SPIN-код: 8045-6232, ORCID, ninelllsss@gmail.com

Заявленный вклад соавторов

Н.В. Пронская, Э. Н. Филатьева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

М.В. Филатьев — научное руководство, анализ результатов исследований, формулирование выводов.

Н.В. Шашло — проведение расчетов, подготовка текста и оформление статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.11.2023
Revised 18.12.2023
Accepted 29.12.2023

About the Authors:

Natalya V. Pronskaya, Assistant of the Mine Surveying, Geodesy and Geology Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, 294204, RF), ORCID, doctressa@mail.ru

Elvira N. Filatieva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fire Safety Department, Lugansk Vladimir Dahl State University (20a, Molodezhny Block, Lugansk, 291034, RF), ORCID, Elafilatyeva@gmail.com

Mikhail V. Filatiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere Safety Department, Lugansk Vladimir Dahl State University (20a, Molodezhny Block, Lugansk, 291034, RF), ORCID, Mfilatev@gmail.com

Nina V. Shashlo, Cand. Sci. (Economics), Head of the Nuclear Program Department, Education Transformation Department, Associate Professor of the Media Technology Department, Media Communications and Multimedia Technologies Faculty, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, SPIN-code: 8045-6232, ORCID, ninelllsss@gmail.com

Claimed contributorship:

NV Pronskaya, EN Filatieva: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study.

MV Filatiev: academic advising, analysis of the research results, formulation of the conclusions.

NV Shashlo: calculations, preparation of the text and design of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING



УДК 628.853:697.934

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-73-81

Оптимизация передаточного числа трансмиссии по расходу топлива

Е.Е. Косенко ✉, **Ю.В. Марченко**, **Э.В. Марченко**, **С.И. Попов**, **А.И. Изюмов**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ a123lok@mail.ru

EDN: IUHJOZ

Аннотация

Введение. Вопросы обеспечения оптимальных режимов расхода топлива являются предметом постоянного исследования в области эксплуатации автотранспортных средств. Работы в области снижения расхода топлива в большинстве случаев посвящены исследованию конструкции силовых установок, трансмиссии или аэродинамических особенностей кузова автомобилей. Вместе с тем вопросы определения оптимальных законов управления неустановившимся движением с точки зрения синтеза алгоритмов управления движением автомобиля не рассматривались. Для оптимизации передаточного числа автомобилей при неустановившимся движении авторами работы проведены аналитические расчеты, позволяющие упростить синтез алгоритмов управления движением, что позволяет снизить расход топлива. Целью работы являлось определение оптимального передаточного числа, позволяющего решить задачу синтеза управления транспортным средством для снижения расхода топлива.

Материалы и методы. Рассматриваемый в работе синтез алгоритмов управления движением автомобиля основан на применении к инвариантным признакам действительного движения игольчатой вариации Л.С. Понтрягина. Использован аналитический метод оценки энергетической эффективности эксплуатационных характеристик автомобиля, в основе которого лежит определение оптимального передаточного числа трансмиссии автотранспортных средств с учетом наименьшего расхода топлива. Представленный метод учитывает величину крутящего момента, передаваемого от коленчатого вала двигателя на элементы трансмиссии, который, в зависимости от мощности двигателя, реализуется в виде силы тяги на колесах автомобиля.

Результаты исследования. Построен закон оптимального изменения передаточного числа трансмиссии при разгоне автомобиля за минимальное время. Решена задача определения оптимального передаточного числа трансмиссии автомобиля в случае движения автомобиля с постоянной скоростью и постоянной подачей топлива, а также при разгоне автомобиля до заданной скорости при постоянной подаче топлива, когда соблюдается условие ε = const. Результатом рассмотренного случая применения оптимального закона изменения передаточного числа трансмиссии является минимизация расхода топлива при ограничениях на ускорение (силу тяги) и скорость движения автомобиля.

Обсуждение и заключение. Применение авторами аналитического метода для определения передаточного числа трансмиссии автомобиля, а также использование данного метода в практических расчетах для автомобиля с заданными характеристиками показывает возможность решения задачи синтеза управления транспортным средством с применением математического аппарата. Это подтверждается построенной графической зависимостью по результатам проведенных расчётов. Рассмотренные случаи движения позволили определить аналитические зависимости оптимального передаточного числа и скорости автомобиля. Исходные данные, полученные по аналитическим зависимостям, применимы для автомобилей со смешанным режимом управления.

Ключевые слова: передаточное число трансмиссии, расход топлива, энергетическая эффективность

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Косенко Е.Е., Марченко Ю.В., Марченко Э.В., Попов С.И., Изюмов А.И. Оптимизация передаточного числа трансмиссии по расходу топлива. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):73–81. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-73-81

Original article

Optimization of the Transmission Ratio by Fuel Consumption

Evgeny E. Kosenko, Julianna V. Marchenko, Edward V. Marchenko, Sergey I. Popov, Andrey I. Izyumov
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ a123lok@mail.ru

Abstract
Introduction. The issues of ensuring optimal fuel consumption modes are the subject of constant research in the field of vehicle operation. Works in the field of reducing fuel consumption in most cases are devoted to the study of the design of power units, transmission or aerodynamic features of the body of cars. At the same time, the issues of determining the optimal laws of control of unsteady movement from the point of view of the synthesis of algorithms for controlling the movement of a car have not been considered. To optimize the transmission ratio of cars with unsteady movement, the authors of the work carried out analytical calculations to simplify the synthesis of motion control algorithms, which in turn allowed reducing fuel consumption. The aim of the work was to determine the optimal transmission ratio, which allowed solving the problem of synthesizing vehicle control to reduce fuel consumption.
Materials and Methods. The synthesis of algorithms for controlling the movement of a car considered in the work was based on the application of the needle variation of L.S. Pontryagin to invariant features of the real movement. An analytical method was used to estimate energy efficiency of vehicle performance, which was based on determination of optimal transmission ratio of motor vehicles taking into account minimum fuel consumption. The presented method took into account the amount of torque transmitted from the engine crankshaft to the transmission elements, which, depending on the engine power, was realized in the form of traction force on the wheels of the car.
Results. The law of optimal change in the transmission gear ratio during acceleration of the car in a minimum time was built. The problem of determining the optimal transmission ratio of the vehicle in the case of driving the vehicle at a constant speed and constant fuel supply and in the case of accelerating the vehicle to a given speed at a constant fuel supply, when the condition $\varepsilon = \text{const}$ was met, was solved. The result of the considered case of applying the optimal law of change in the transmission gear ratio was the minimization of fuel consumption under restrictions on acceleration (traction force) and speed of the car.
Discussion and Conclusion. The use by the authors of the analytical method for determining the transmission ratio of a car, as well as the use of this method in practical calculations for a car with given characteristics, showed the possibility of solving the problem of synthesizing vehicle control using a mathematical apparatus. This was confirmed by the built graphical dependence based on the results of the calculations. The considered cases of movement made it possible to determine the analytical dependencies of the optimal transmission ratio and the speed of the car. The initial data obtained by analytical relationships are applicable for cars with a mixed control mode.

Keywords: transmission ratio, fuel consumption, energy efficiency

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Kosenko EE, Marchenko JuV, Marchenko EV, Popov SI, Izyumov AI. Optimization of the Transmission Ratio by Fuel Consumption. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):73–81. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-73-81

Введение. При движении автомобильного транспорта**,** с учетом его перемещения в условиях городских застроек, режим управления транспортным средством является смешанным с чередованием разгона и торможения, а также с необходимостью различного маневрирования. Подобное управление приводит к повышенному расходу топлива. Уменьшение расхода топлива в таких условиях, как правило, связано с необходимостью увеличения времени совершения маневров [1]. Это вызывает необходимость поиска оптимальных законов управления неустановившимся движением автомобиля. В работе [2] энергетические характеристики перемещения транспортного средства определяются в первую очередь величиной передаваемого от коленчатого вала двигателя крутящего момента и реализуемой на движителях силы тяги, которые зависят от мощности двигателя и значения передаточных чисел. Необходимость определения

оптимальных значений передаточных чисел трансмиссии транспортного средства обусловлена уменьшением значений топливных характеристик [3], а также уменьшением величины энергии, которая тратится при маневрировании автомобиля в случае неустановившегося движения. Передаточные числа определяются в соответствии с заданной характеристикой двигателя и в зависимости от скорости перемещения транспортного средства, имеющей переменные значения [4].

При рассмотрении применяемых подходов для решения задач, связанных с оптимизацией, следует сказать об их многообразии. Большая часть таких подходов использует методы оптимального управления и вариационного исчисления. Авторы в [5] использовали принцип максимума Л.С. Понтрягина с определением аналитических зависимостей для гибридных автомобилей. Подобный подход рассматривается и в работе [6], на основе которого предлагается построение закона оптимального изменения передаточного числа трансмиссии при разгоне автомобиля за минимальное время, а также определение топливной экономичности в ездовом цикле [7]. Анализ проведенных исследований показал значительный теоретический задел в области определения оптимального передаточного числа при различных режимах эксплуатации автомобиля. Вместе с тем, следует сказать, что оптимальный закон изменения передаточного числа трансмиссии должен определяться с учетом минимизации расхода топлива при ограничениях на ускорение (силу тяги) и скорость движения автомобиля. Авторами представленной работы предлагается для определения оптимальных законов управления неустановившимся движением (с точки зрения синтеза алгоритмов управления) применить метод оптимизации, в основе которого лежит применение к инвариантным признакам действительного движения игольчатой вариации Л.С. Понтрягина. Предлагаемый подход авторами ранее проведенных исследований не рассматривался.

Целью работы является определение оптимального передаточного числа, позволяющего решить задачу синтеза управления транспортным средством для оптимизации расхода топлива.

Материалы и методы. При расчете мгновенного расхода топлива автомобиля используем следующую зависимость:

$$G_T = q_N K_\omega K_N N_e, \tag{1}$$

где q_N — показатель удельного расхода топлива, соответствующий максимальному значению $N_e = N_{max}$; K_ω — значение коэффициента, определяемого с учетом скоростного режима работы двигателя; K_N — значение коэффициента, определяемого с учетом степени загрузки двигателя; N_e — мощность двигателя в текущий момент времени.

Коэффициенты K_ω и K_N определяли с учетом эмпирических зависимостей, K_ω — с учетом скоростного режима работы двигателя. Определим его по формуле:

$$K_\omega = a_\omega - b_\omega \cdot \frac{\omega_e}{\omega_N} + c_\omega \cdot \left(\frac{\omega_e}{\omega_N}\right)^2, \tag{2}$$

где a_ω = 1,27; b_ω = 0,94; c_ω = 0,67; ω_e — текущее значение угловой скорости коленчатого вала; ω_N — угловая скорость вращения коленчатого вала, соответствующая максимальной мощности двигателя N_{max}.

Величина ω_e связана с передаточным числом трансмиссии i и скоростью движения автомобиля $\dot{x}$ зависимостью:

$$\omega_e = (i \cdot \dot{x}) / r_к . \tag{3}$$

Тогда формула (2) примет вид:

$$K_\omega = a_\omega - \frac{b_\omega}{\omega_N r_к}(i \cdot \dot{x}) + \frac{c_\omega}{(\omega_N r_к)^2}(i \cdot \dot{x})^2 . \tag{4}$$

Коэффициент K_N зависит от степени загрузки двигателя ε. Значение ε определяли отношением мощности двигателя в текущий момент времени независимо от режима движения транспортного средства. Принимали в расчет: текущее значение угловой скорости коленчатого вала ω_e, мощность двигателя N_{ec} в момент полной подачи топлива и такое же значение угловой скорости коленчатого вала ω_e:

$$\varepsilon = \frac{N_e}{N_{ec}}. \tag{5}$$

Значение текущей мощности двигателя N_e определяли дифференциальным уравнением движения автомобиля по оси x, имеющего вид [5]:

$$\frac{\delta}{g}\ddot{x} = \frac{N_e \eta_T}{mg\dot{x}} - \psi - k\dot{x}^2. \tag{6}$$

Здесь δ — значение коэффициента, определяемого с учетом затрат мощности с учетом приращения кинетической энергии вращающихся масс двигателя, трансмиссии и колес при разгоне автомобиля;

η_T — коэффициент полезного действия трансмиссии; m — полная масса автомобиля; $\psi = f\,cos\alpha + sin\alpha$ — коэффициент сопротивления движению; k — коэффициент обтекаемости, определяющий силу сопротивления воздуха.

Коэффициент δ в представленной работе определили по следующей зависимости $\delta = 1 + \gamma i^2$, в которой значение γ зависит от конструктивных параметров автомобиля и изменяется в пределах γ = 0,001–0,003. Тогда из уравнения (6) можно получить выражение для текущего значения мощности двигателя:

$$N_e = \frac{mg\dot{x}}{\eta_T}\left[\frac{1+\varepsilon i^2}{g}\ddot{x} + \psi(t) + k\dot{x}^2\right]. \quad (7)$$

Значение мощности двигателя N_{ec} в момент максимальной подачи топливной смеси определили с помощью известной зависимости (формула Лейдермана) для внешней характеристики двигателя, имеющей вид:

$$N_{ec} = N_{max}\frac{\omega_e}{\omega_N}\left[A + B\frac{\omega_e}{\omega_N} - C\left(\frac{\omega_e}{\omega_N}\right)^2\right]. \quad (8)$$

Эмпирические коэффициенты *A, B, C*, зависящие от параметров двигателя, могут определяться, например, по зависимостям, приведенным в работе [5]. После преобразований с учетом (3) выражение (8) принимает вид

$$N_{ec} = F(ai\dot{x} + bi^2\dot{x}^2 - ci^3\dot{x}^3), \quad (9)$$

где коэффициенты *a, b* и *c* определили по формулам:

$$F = \frac{N_{max}}{\omega_N r_k};\ a = A;\ b = \frac{B}{\omega_N r_k};\ c = \frac{C}{(\omega_N r_k)^2}.$$

Эмпирическая зависимость для коэффициента K_N имеет вид:

$$K_N = a_N + b_N\cdot\varepsilon - c_N\cdot\varepsilon^2 - d_N\cdot\varepsilon^3, \quad (10)$$

где константы a_N = 3,27; b_N = – 8,22; c_N = – 9,13; d_N = 3,18 для бензиновых двигателей; a_N = 1,20; b_N = 0,14; c_N = 1,80; d_N = – 1,46 для дизельных двигателей.

Степень загрузки двигателя *ε* в зависимости (10) с учетом (5), (7) и (9) определили по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{mg\omega_N r_k}{N_{max}\eta_T}\left[\dfrac{1+\gamma i^2}{g}\ddot{x} + \psi(t) + k\dot{x}^2\right]}{ai + bi^2\dot{x} - ci^3\dot{x}^2}. \quad (11)$$

В качестве целевой функции использовали величину расхода топлива за время $t_к$, в течение которого осуществляется движение автомобиля на траектории $x(t) \le x_к$ с переменной скоростью $\dot{x} = f(t)$. Задача оптимизации решали в соответствии со следующим алгоритмом: устанавливали закон, в соответствии с которым определяется изменение передаточного числа трансмиссии $i(\dot{x})$, и соответствующую ему траекторию *x(t)* с таким учетом, чтобы целевой функционал принимал минимальное значение:

$$J = \int_0^{t_K} G_T\dot{x}dt \to min, \quad (12)$$

передаточное число, текущие скорость и мощность удовлетворяли ограничениям:

$$i \ge i_0,\ \dot{x} \le \dot{x}_{max},\ N_e \le N_{max}, \quad (13)$$

где i_0 — передаточное число главной передачи.

Результаты исследования. Результаты проведенных расчетов были использованы для случая непрерывного изменения передаточного числа трансмиссии. Тогда, пренебрегая инерцией вращающихся масс (при γ = 0), оптимальное значение $i_{опт}$, если оно существует, находится из условия:

$$\frac{\partial(G_T\dot{x})}{\partial i} = \left(\frac{\partial K_\omega}{\partial i} + \frac{\partial K_N}{\partial i}\frac{K_\omega}{K_N}\right)\dot{x} + K_\omega\frac{\partial\dot{x}}{\partial i} = 0. \quad (14)$$

Полученное выражение (15) в качестве результатов исследования применили для двух предельных случаев.

Первый случай — движение автомобиля с постоянной скоростью $\dot{x} = const$ и постоянной подачей топлива, когда *ε* и K_N = *const*. Поэтому второе слагаемое в уравнении (14) равно нулю, что позволяет получить простую формулу для определения оптимального передаточного числа трансмиссии:

$$i_{opt} = \frac{b_\omega\omega_N r_к}{2c_\omega\dot{x}} \quad (15)$$

https:// bps-journal.ru

При минимизации времени разгона до заданной скорости оптимальное передаточное число трансмиссии определили по формуле [5]:

$$i_{opt}^{p} = \frac{B\omega_N r_к}{3C\dot{x}}\left(1+\sqrt{1+\frac{3AC}{B^2}}\right). \quad (16)$$

Второй случай — разгон автомобиля до заданной скорости при постоянной подаче топлива, когда соблюдается условие ε = const. В этом случае значение коэффициента $K_N = const$ и оптимальное передаточное число трансмиссии определили по формуле из решения уравнения:

$$\frac{\partial K_\omega}{\partial i}\dot{x} + K_\omega \frac{\partial \dot{x}}{\partial i} = 0.$$

После преобразований с учетом выражения (4) для K_ω получим:

$$\left[-\frac{b_\omega}{\omega_N r_к}\dot{x} + 2\frac{c_\omega}{(\omega_N r_к)^2} i\cdot\dot{x}^2\right]\dot{x} + \left[a_\omega - \frac{b_\omega}{\omega_N r_к}(i\cdot\dot{x}) + \frac{c_\omega}{(\omega_N r_к)^2}(i\cdot\dot{x})^2\right]\frac{\partial\dot{x}}{\partial i} = 0. \quad (17)$$

Производную $\frac{\partial \dot{x}}{\partial i}$ в уравнении (17) определили из условия ε = *const* с использованием выражения (11). При этом будем пренебрегать, как и ранее, инерцией вращающихся масс (γ = 0) и силой сопротивления воздуха $\left(k\dot{x}^2 \approx 0\right)$. Тогда связь между скоростью движения автомобиля и передаточным числом трансмиссии установим (при ε = *const*) из решения следующего уравнения:

$$ci^3\dot{x}^2 - bi^2\dot{x} - ai + \frac{z(t)}{\varepsilon d} = 0,$$

где введены обозначения:

$$d = \frac{N_{max}\eta_T}{mg\omega_N r_k},\ z(t) = \left[\frac{\ddot{x}}{g} + \psi(t)\right].$$

Полученное уравнение относительно скорости имеет решение, если его дискриминант больше или равен нулю.

$$D = b^2 i^4 + 4aci^4 - \frac{4ci^3}{\varepsilon d} z(t) \ge 0.$$

Тогда для передаточного числа трансмиссии должно выполняться условие:

$$i_* \ge \frac{z(t)}{\varepsilon d(B^2/4C + A)}. \quad (18)$$

Соответствующее этому условию значение скорости определили по формуле:

$$\dot{x}_* = \frac{B\omega_N r_k}{2Ci_*}\left\{1+\sqrt{1+\frac{4C}{B^2}\left[A - \frac{z(t)}{\varepsilon d i_*}\right]}\right\}. \quad (19)$$

При разгоне автомобиля предельное (минимальное) значение передаточного числа трансмиссии i_{min} определили из условия (18), что позволяет получить достаточно простое выражение для производной $\frac{\partial \dot{x}}{\partial i}$ и распространить его на всю траекторию движения:

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial i} = -\frac{b}{2ci_{min}^2} = -\frac{B}{2Ci_{min}^2}\omega_N r_k. \quad (20)$$

Подставляя полученные выражения в уравнение (17), после преобразований получим уравнение для оптимального значения передаточного числа трансмиссии:

$$\left[-\frac{b_\omega}{\omega_N r_к}\dot{x} + 2\frac{c_\omega}{(\omega_N r_к)^2} i\cdot\dot{x}^2\right]\dot{x} + \left[a_\omega - \frac{b_\omega}{\omega_N r_к}(i\cdot\dot{x}) + \frac{c_\omega}{(\omega_N r_к)^2}(i\cdot\dot{x})^2\right]\frac{\partial\dot{x}}{\partial i} = 0,$$

$$\left[-\frac{Bb_\omega}{2Ci_*}\beta + \frac{c_\omega B^2}{2C^2}\beta\right]\frac{B\omega_N r_k}{2Ci_*}\beta - \left[a_\omega - \frac{b_\omega B}{2C}\beta + c_\omega\left(\frac{B}{2C}\beta\right)^2\right]\frac{B}{2Ci_{min}^2}\omega_N r_k = 0,$$

$$\left[-\frac{b_\omega}{i_*} + \frac{2c_\omega B}{C}\right]\frac{\omega_N r_k}{i_*} - \left[\frac{2Ca_\omega}{B\beta^2} - \frac{b_\omega}{\beta} + c_\omega\left(\frac{B}{2C}\right)\right]\frac{\omega_N r_k}{i_{min}^2} = 0,$$

$$\left[-\frac{b_\omega}{i_*} + \frac{2c_\omega B}{C}\right]\frac{1}{i_*}\omega_N r_k - \frac{R}{i_{min}^2}\omega_N r_k = 0,$$

$$-b_{\omega}+\frac{2c_{\omega}B}{C}i_{*}\omega_N r_k-\frac{Ri_{*}^{2}}{i_{min}^{2}}\omega_N r_k=0,$$

$$\frac{Ri_{*}^{2}}{i_{min}^{2}}-\frac{2c_{\omega}B}{C}i_{*}\omega_N r_k+b_{\omega}\omega_N r_k=0,$$

$$i_{*opt}=i_{min}^{2}\left[\frac{c_{\omega}B}{RC}\mp\sqrt{\left(\frac{c_{\omega}B}{RC}\right)^{2}\omega_N r_k-\frac{b_{\omega}}{i_{min}^{2}R}\omega_N r_k}\right],$$

$$R=\left[\frac{2Ca_{\omega}}{B\beta^{2}}-\frac{b_{\omega}}{\beta}\omega_N r_k+c_{\omega}\left(\frac{B}{2C}\right)\omega_N r_k\right],$$

$$i_{min}=\frac{z(t)}{\varepsilon d(B^{2}/4C+A)}\omega_N r_k.$$

Для примера провели расчет расхода топлива для автомобиля со следующими характеристиками: полная масса автомобиля m = 1800 кг; коэффициенты внешней характеристики двигателя A = 0,64; $Б$ = 1,36; C = 1,0; максимальная мощность двигателя N_{max} = 100 кВт; угловая скорость вращения коленчатого вала, соответствующая максимальной мощности двигателя ω_N = 576 с$^{-1}$; радиус колеса r_k = 0,34 м; КПД трансмиссии $\eta_{тр}$ = 0,85; передаточное число главной передачи i_0 = 3,4 и передаточные числа коробки переключения передач i_5 = 1,0; i_4 = 1,5; i_3 = 2,2; i_2 = 3,2; i_1 = 4,8; коэффициент вращающихся масс δ = 1,0; коэффициент сопротивления движению ψ = 0,12.

Приведенный пример расчета расхода топлива для автомобиля с заданными характеристиками наглядно показывает решение задачи синтеза управления транспортным средством. Графики разгона автомобиля со ступенчатой коробкой переключения передач, иллюстрирующие решением для оптимального закона изменения передаточного числа, приведены на рис. 1. Для сравнения представлен график для разгона транспортного средства со ступенчатой коробкой переключения передач, который был построен по полученной аналитической зависимости.

На первом этапе разгона до скорости $\dot{x}_{мин}$ кривые совпадают. В данном случае $\dot{x}_{мин}$ = 6.14 м/с или 22,1 км/ч.

$$V_i(t)=\frac{V_{i1}\frac{V_{0i}-V_{i2}}{V_{0i}-V_{i1}}exp\left[t\sqrt{b_i^{2}+4a_ic_i}\right]-V_{i2}}{\frac{V_{0i}-V_{i2}}{V_{0i}-V_{i1}}exp\left[t\sqrt{b_i^{2}+4a_ic_i}\right]},\qquad(21)$$

$$a_i=\frac{A\phi_{\partial max}-\psi}{\delta}G;\ b_i=\frac{\beta_i\phi_{\partial max}}{\delta}G.\qquad(22)$$

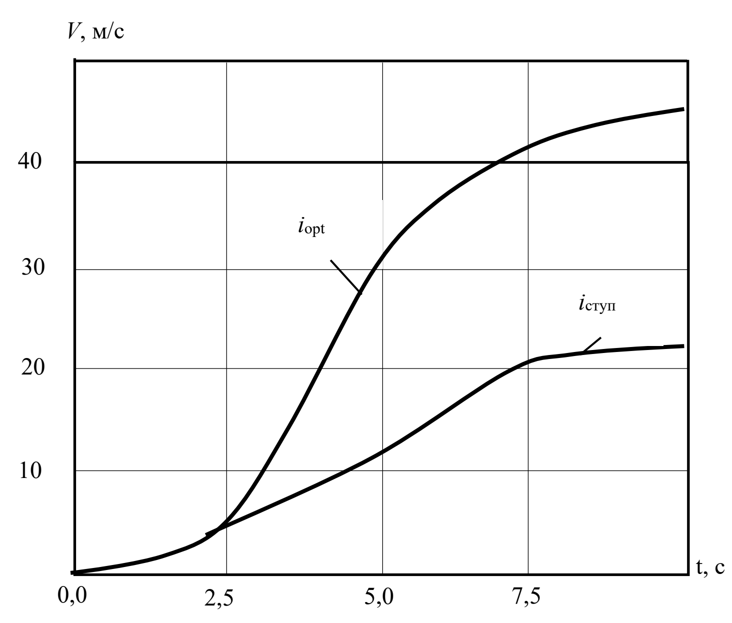


Рис. 1. Графики разгона автомобиля со ступенчатой коробкой переключения передач (сухая укатанная дорога α = 100; f = 0,025; ψ = 0,118):
i_{opt} — оптимальное передаточное число трансмиссии;
$i_{ст}$ — передаточное число, определяемое по времени разгона

$$c_i = \frac{\gamma_i \phi_{Дmax}}{\delta} G;\ V_{i1,2} = \frac{b_i \pm \sqrt{b_i^2 + 4a_i c_i}}{2c_i}, \tag{23}$$

где $\varphi_{Дmax}$ — коэффициент мощности двигателя; V_{0i} — начальная скорость машины на i-той передаче; $i = \overline{1,3}$ — индекс, обозначающий номер передачи; $V_i(t)$ — скорость машины на i-той передаче.

Обсуждение и заключение. Применение авторами аналитического метода для определения передаточного числа трансмиссии, а также использование данного метода в практических расчетах для автомобиля с заданными характеристиками показывает возможность решения задачи синтеза управления транспортным средством с применением математического аппарата.

Поставленная авторами работы цель — определение оптимального передаточного числа, позволяющего решить задачу синтеза управления транспортным средством для снижения расхода топлива — была достигнута. Результатом проведенных исследований являются аналитические зависимости, полученные для двух предельных случаев движения автомобиля.

Проведенные авторами расчеты для первого случая показали оптимальное значение передаточного числа трансмиссии, которое определили в соответствии с формулами (15) и (16). Значение передаточного числа трансмиссии обратно пропорционально скорости движения автомобиля. Значение скорости, определяемое для оптимального передаточного числа трансмиссии будет меньше, чем передаточное число, определяемое по времени разгона. Формирование эмпирической зависимости во втором случае при переменной подаче топлива $K_N = f(t)$ и оптимальное передаточное число трансмиссии были определены в результате численного решения уравнения (14).

Важность проведенного исследования заключается в упрощении решения задачи синтеза управления неустановившимся движением транспортного средства, что наглядно показывают полученные графические зависимости. Подобный результат возможен при применении объединенного принципа максимума.

Список литературы

1. Додонов Б.М., Кольцов В.И., Долгов И.А. Управление курсовым движением автомобиля по направляющей точке. *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки.* 2009;(4):45–61. https://doi.org/10.20537/vm090405

2. Deryushev V.V., Kosenko V.V., Zagutin D.S., Arakelyan R.M., Krymsky V.S. The motor vehicles transmission number optimum management. In: *AIP Conference Proceedings. XV International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems" (DTS 2019).* Rostov-on-Don; 2019. 2188(1):020010. https://doi.org/10.1063/1.5138384

3. Popov S., Marchenko J., Kosenko E., Dontsov N., Khvan R., Demchenko D. Estimation of the residual life of cars In: *XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022». Lecture Notes in Networks and Systems.* Vol. 575, Cham: Springer; 2023. P. 1276–1283 https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_143

4. Marchenko Yu.V., Deryushev V.V., Popov S.I., Marchenko E.V. Model of multi-parameter optimization of the characteristics of a cable car in a solid waste transportation system. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(4):80–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

5. Макаров А.В., Макаров В.Г., Афанасьев А.Ю. Оптимальное управление гибридной силовой установкой транспортного средства при движении с постоянной скоростью. *Вестник Чувашского университета.* 2019;(3):150–158. URL: https://www.chuvsu.ru/wp-content/uploads/2020/04/2019_3.pdf (дата обращения: 14.11.2023) (In Russ.).

6. Горохов Д.А. Моделирование системы управления курсовой устойчивостью автомобиля. *Научные труды КубГТУ.* 2016;(6):29–35. URL: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0027/1001.pdf (дата обращения: 14.11.2023) (In Russ.).

7. Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Понякин В.В. Влияние передаточного числа главной передачи на топливную экономичность автомобиля в ездовом цикле. *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.* 2018;15(1(59)):19–29. URL: https://vestnik.sibadi.org/jour/issue/viewFile/18/6 (дата обращения: 14.11.2023) (In Russ.).

References

1. Dodonov BM, Koltsov VI, Dolgov IA. Control of the motor car's directional motion. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki.* 2009;(4):45–61. https://doi.org/10.20537/vm090405 (In Russ.).

2. Deryushev VV, Kosenko VV, Zagutin DS, Arakelyan RM, Krymsky VS. The motor vehicles transmission number optimum management. In: *AIP Conference Proceedings. XV International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems" (DTS 2019).* Rostov-on-Don; 2019. 2188(1):020010. https://doi.org/10.1063/1.5138384

3. Popov S, Marchenko J, Kosenko E, Dontsov N, Khvan R, Demchenko D. Estimation of the residual life of cars In: *XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022». Lecture Notes in Networks and Systems.* Vol. 575, Cham: Springer; 2023. P. 1276–1283 https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_143

4. Marchenko YuV, Deryushev VV, Popov SI, Marchenko EV. Model of multi-parameter optimization of the characteristics of a cable car in a solid waste transportation system. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(4):80–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

5. Makarov A, Makarov V, Afanasiev A. Optimal control of hybrid electric vehicle with constant speed. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta.* 2019;(3):150–158. URL: https://www.chuvsu.ru/wp-content/uploads/2020/04/2019_3.pdf (accessed: 14.11.2023).

6. Gorokhov DA. Modeling of vehicle stability management system. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2016;(6):29–35. URL: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0027/1001.pdf (accessed: 14.11.2023).

7. Gorozhankin SA, Savenkov NV, Ponyakin VV. Influence of main gear ratio on car fuel efficiency in the drive cycle. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2018;15(1(59)):19–29. URL: https://vestnik.sibadi.org/jour/issue/viewFile/18/6 (accessed: 14.11.2023).

Поступила в редакцию 29.11.2023
Поступила после рецензирования 25.12.2023
Принята к публикации 09.01.2024

Об авторах:

Евгений Евгеньевич Косенко, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 3448-5049, ORCID, a123lok@mail.ru

Юлианна Викторовна Марченко, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2166-7988, ORCID, marchenko-6470@mail.ru

Сергей Иванович Попов, кандидат технических наук, доцент, кафедры робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, SPIN-код: 4449-5231, ORCID, spopov1957@yandex.ru

Эдвард Викторович Марченко, доцент кафедры робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, SPIN-код: 6902-5129, ORCID, daedwardrambler.ru@mail.ru

Андрей Игоревич Изюмов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344039, РФ, Ростов-на-Дону, Советский район, ул. Праздничная, д. 86), SPIN-код: 4389-2093, ORCID, Andrei-Igorevich1991@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:
Е.Е. Косенко — формирование основной концепции.
Ю.В. Марченко — цели и задачи исследования.
С.И. Попов — проведение расчетов.
Э.В. Марченко — подготовка текста.
А.И. Изюмов — формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.11.2023
Revised 25.12.2023
Accepted 09.01.2024

About the Authors:

Evgeny E. Kosenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, SPIN-код: 3448-5049, a123lok@mail.ru

Julianna V. Marchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 2166-7988, ORCID, marchenko-6470@mail.ru

Sergey I. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 4449-5231, ORCID, spopov1957@yandex.ru

Edward V. Marchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 6902-5129, ORCID, daedwardrambler.ru@mail.ru

Andrey I. Izyumov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (86, Prazdnichnaya St., Sovetsky district, Rostov-on-Don, 344039, RF), SPIN-code: 4389-2093, ORCID, Andrei-Igorevich1991@yandex.ru

Claimed contributorship:
EE Kosenko: formulation of the basic concept.
JV Marchenko: goals and objectives of the study.
SI Popov: calculations.
EV Marchenko: preparation of the text.
AI Izyumov: formulation of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



Check for updates

УДК 621.793
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-82-87

Научная статья

Содержание и дисперсность ферросплавов в обмазке при микродуговом легировании стали



EDN: MPIXIR

М.С. Степанов ✉, **Ю.М. Домбровский**



Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ stepanovms@yandex.ru

Аннотация

Введение. Основным недостатком традиционных процессов диффузионного поверхностного упрочнения стальных изделий является большая продолжительность, поэтому проблема интенсификации таких процессов является актуальной. Для ее решения предложено применение высокоэнергетического воздействия на материал, позволяющего получить упрочненный поверхностный слой из обмазки, в состав которой входят порошки ферросплавов, содержащие легирующие элементы. В литературе отсутствуют данные о необходимом содержании и дисперсности таких порошков в составе обмазки. Цель исследования — выбор размера частиц ферросплавов и их концентрации в обмазке для достижения максимально эффективного упрочнения обрабатываемого изделия.

Материалы и методы. Для экспериментальных исследований использовали цилиндрические образцы из стали 20 диаметром 12 мм и длиной 35 мм, на поверхность которых наносили легирующую обмазку, содержащую порошки ферросплавов и электропроводный гель в качестве связующего. После этого образцы погружали вертикально на половину длины в металлический контейнер, который далее заполняли угольным порошком с размером частиц 0,4–0,6 мм. Затем пропускали электрический ток величиной от 2,5 до 3,0 А в цепи источник питания — контейнер — угольный порошок — образец. Продолжительность процесса составляла 2–8 мин.

Результаты исследования. Выполнена расчетная оценка электрической проводимости угольного порошка, рассчитаны теплофизические параметры микродугового нагрева стали: мощность, выделяемая электрическим током на поверхности стального изделия, плотность теплового потока, энергия единичного микродугового разряда. Получены выражения для расчета размера частиц порошка ферросплавов, а также экспериментальные зависимости толщины диффузионного слоя от размера частиц ферросплавов и их содержания в обмазке.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволили определить диапазон размеров частиц ферросплавов и их содержание в обмазке, позволяющие обеспечить наиболее эффективное легирование поверхности обрабатываемых изделий. Полученные данные будут использованы при разработке технологических процессов поверхностного упрочнения стальных изделий.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, энергия микродуги, диффузионное насыщение стали

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и ценные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Содержание и дисперсность ферросплавов в обмазке при микродуговом легировании стали. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):82–87 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-82-87

Original article

Content and Dispersion of Ferroalloys in the Coating During Microarc Alloying of Steel

Makar S. Stepanov ✉, **Yuriy M. Dombrovskii**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉stepanovms@yandex.ru

Abstract
Introduction. The main disadvantage of traditional processes of diffusion surface hardening of steel products is its long duration. Therefore, the problem of intensification of such processes is relevant. To solve it, the use of high-energy effects on the material is proposed, which allows us to obtain a hardened surface layer from a coating composed of ferroalloy powders containing alloying elements. There is no data in the literature on the required content and dispersion of such powders in the composition of the coating. The aim of this study was to select the particle size of ferroalloys and their concentration in the coating to achieve the most effective hardening of the processed product.
Materials and Methods. For experimental studies, cylindrical samples made of steel 20 with a diameter of 12 mm and a length of 35 mm were used. On the surface of these samples, an alloying coating containing ferroalloy powders and an electrically conductive gel as a binder was applied. After that, the samples were immersed vertically for half their length into a metal container, which was then filled with carbon powder with a particle size of 0.4–0.6 mm. Then an electric current of 2.5 to 3.0 A was passed in the circuit power source — container — carbon powder — sample. The duration of the process was 2–8 minutes.
Results. The calculated estimation of the electrical conductivity of coal powder was performed, and the thermophysical parameters of microarc heating of steel were calculated. These include the power released by electric current on the surface of the steel product, the density of the heat flux, and the energy of a single microarc discharge. The expressions for calculating the particle size of ferroalloy powder were obtained, as well as the experimental dependencies of the diffusion layer thickness on the particle size of ferroalloys and their content in the coating.
Discussion and Conclusion. The results of this study have allowed us to determine the size range of ferroalloys and their content in the coating. This information is essential for optimizing the alloying process and ensuring the most efficient surface hardening treatment for steel products. The data collected will be used to develop improved technological processes for the surface hardening process, leading to improved product quality and performance.

Keywords: chemical-thermal treatment, microarc energy, diffusion saturation of steel

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the valuable comments that improved the quality of the article.

For citation. Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Content and Dispersion of Ferroalloys in the Coating During Microarc Alloying of Steel. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):82–87 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-82-87

Введение. Продолжительность различных процессов химико-термической обработки (ХТО) стали может достигать 8–10 часов [1, 2]. Поэтому ранее были предложены методы их интенсификации, основанные на применении высокоэнергетического воздействия на материал с использованием плазменного нагрева [3], электро-химико-термической обработки [4], комбинированных способов нагрева [5], лазерной обработки [6], микродугового оксидирования [7], нагрева в электролите [8]. Однако эти методы сложны для практического применения и поэтому не получили широкого распространения. Для интенсификации процессов ХТО целесообразно применение микродугового поверхностного легирования, которое позволяет достичь значительного (в десятки раз) ускорения процесса диффузионного насыщения, и не требует использования сложного оборудования. Особенностью данного метода является погружение обрабатываемого изделия с нанесенной на его поверхность обмазкой в угольный порошок с последующим пропусканием через них электрического тока. Интенсификация процесса насыщения достигается за счет образования ионов диффузанта и их последующей ускоренной диффузии в материал под действием электрического и температурного полей. В ранее проведенных исследованиях достигнуты положительные результаты применения данного метода для диффузионного насыщения хромом, молибденом, ванадием [9], вольфрамом [10]. Для комплексного насыщения на поверхность обрабатываемого изделия предварительно наносилась обмазка, в состав которой входил порошок ферросплава, содержащего диффузант. Эти исследования позволили определить структуру и фазовый состав полученных покрытий, но задача достижения максимальной эффективности упрочнения, для решения которой необходимо определение оптимальных размеров частиц ферросплава и его содержания в обмазке, в ранее проведенных исследованиях не ставилась.

Цель исследования — определение условий максимально эффективного упрочнения стальных изделий методом микродугового легирования за счет выбора размеров частиц порошков ферросплавов и их концентрации в используемой обмазке.

Материалы и методы. Для экспериментальных исследований использовали образцы из стали 20, содержащей 0,2 мас. % С, диаметром 12 мм, на поверхность которых наносили обмазку, приготовленную на основе электропроводного геля с добавкой порошков ферросплавов. Образцы погружали вертикально на половину длины в металлический контейнер диаметром 35 мм, который далее засыпали угольным порошком с размером частиц 0,4–0,6 мм. Далее через образец пропускали электрический ток величиной от 2,5 до 3,0 А в течение 2–8 мин.

Для приготовления обмазки использовали порошки феррохрома, ферромолибдена, феррованадия, ферровольфрама с размером частиц 0,40–0,50 мкм и связующее в объемном соотношении 1:1.

Образцы подвергали шлифовке и полировке по стандартной методике с последующим травлением реактивом Ржешотарского. Микроструктуру диффузионного слоя исследовали с помощью микроскопа Neophot–21.

Для измерения насыпной плотности угольного порошка использовали методику по ГОСТ 32558–2013. Порошок рассеивали по размерам частиц с помощью набора сит по ГОСТ 33 029–2014.

Результаты исследований. Насыпная плотность угольного порошка, т.е. масса единицы объема свободно насыпанного порошка определена экспериментально, полученные значения приведены на рис. 1.

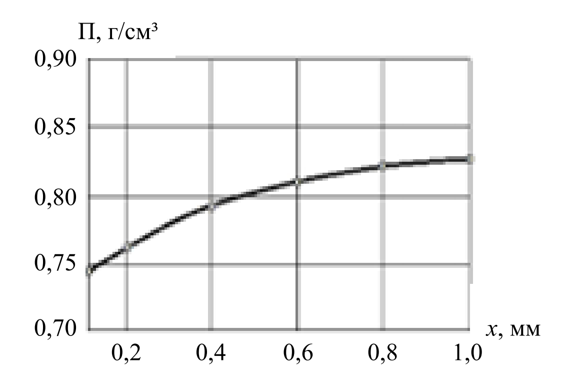


Рис. 1. Зависимость насыпной плотности П угольного порошка от размеров *X* его частиц

В диапазоне размеров от 0,4 до 0,6 мм среднее значение насыпной плотности можно принять равным 0,81 г/см^3. Полученное значение позволило определить объемную плотность угольного порошка как отношение насыпной плотности к плотности каменного угля, значение которого заимствовано из справочной литературы [11] и принято равным 1,6 г/см^3, откуда объемная плотность принята равной 0,81/1,6 = 0,51. Полученное значение примерно соответствует плотности упаковки простой кубической решетки (0,52). Поэтому, согласно [12], можно принять, что общее сопротивление порошковой среды представляет собой сумму сопротивлений последовательных слоев, состоящих из параллельных цепочек из контактного сопротивления $R_К$ между частицами и сопротивление $R_М$ самих частиц (рис. 2).

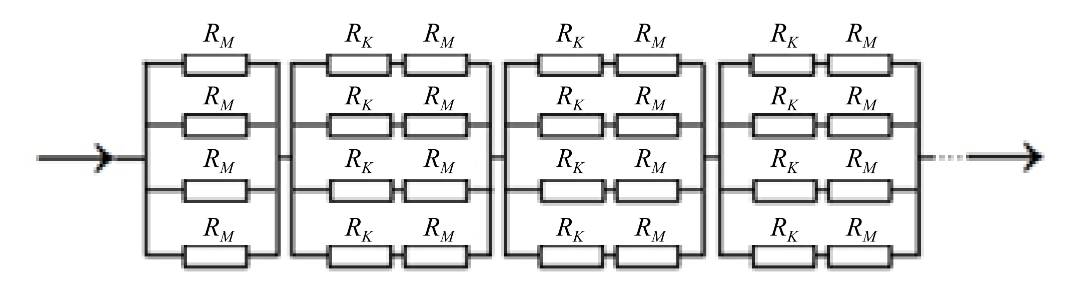


Рис. 2. Электрические контакты угольных частиц в порошковой среде:
$R_К$ — сопротивление межчастичных контактов, $R_М$ — сопротивление отдельной угольной частицы

Расчет по данным рис. 2 позволил оценить общее электрическое сопротивление R порошковой среды:

$$R = \sum_{m=0}^{n} \frac{(R_K + R_M)d^2}{2\pi H(r + dj)} \tag{1}$$

где m — количество слоев угольных частиц, r — радиус образца; d — диаметр частиц, H — глубина погружения образца, $R_К$ — сопротивление межчастичного контакта; $R_М$ — сопротивление отдельной угольной частицы. Для расчетов были приняты следующие значения: $d = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, $H = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, r = 6 мм, R_K = 6 кОм, R_M = 0. Значение R принято равным 15,5 Ом. Полученное значение позволило рассчитать: мощность электрического тока $P = I^2R$,

энергию единичного микродугового разряда Q_0, поверхностную плотность тока f, плотность q теплового потока. Величина Q_0 определена как отношение мощности тока к суммарному количеству микродуг, которые в течение 1 секунды одновременно воздействуют на нагреваемую поверхность. По данным видеозаписи значение M принято равным 22 500. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения теплофизических параметров микродугового нагрева

I, А	$f \cdot 10^{-2}$, А/см^2	$P \cdot 10^2$, Вт	$q \cdot 10^5$, Вт/м^2	$Q_0 \cdot 10^{-3}$, Дж
2,50	45	0,97	1,71	4,3
2,75	49	1,17	2,07	5,2
3,0	53	1,39	2,47	6,2

Далее рассчитали максимальный размер d_{max} частицы ферросплава, для парообразования которой достаточно энергии одной микродуги.

Необходимое количество теплоты Q, с учетом удельной теплоты сублимации λ, можно записать как: $Q = \lambda m$, где m — масса частицы.

Для сферической частицы плотностью ρ:

$$m = \rho V = \frac{1}{6}\rho \pi d^3 .$$

Поэтому искомое условие имеет вид:

$$\lambda \rho \pi d^3 / 6 \le Q_0 .$$

Максимальный диаметр частицы, необходимый для выполнения этого неравенства:

$$d_{max} = \sqrt[3]{\frac{6Q_0}{\lambda \pi \rho}} . \quad (2)$$

Рассчитанные значения d_{max} представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Ферросплав		*Fe+Cr*	*Fe+Mo*	*Fe+V*	*Fe+W*
d_{max}, мм	0,45 А/см^2	0,045	0,043	0,044	0,038
	0,49 А/см^2	0,048	0,046	0,047	0,040
	0,53А/см^2	0,050	0,048	0,050	0,042

Таким образом, установлено, что максимальный размер частиц ферросплавов, используемых в составе обмазки, не должен превышать 38 мкм.

Экспериментально определена толщина диффузионного слоя в зависимости от объемной доли частиц феррохрома в обмазке и ее толщины. Для этого в связующее добавляли порошок феррохрома ФХ010А с размером частиц 40–50 мкм в количестве, необходимом для получения его объемного содержания в пределах 10–50 %.

Результаты представлены на рис. 3. Видно, что максимальная толщина покрытия образуется при объемной концентрации частиц феррохрома в обмазке 50 % и ее толщине 0,5 мм. Таким образом, максимальная интенсификация процесса диффузионного насыщения достигается при условии наибольшего содержания частиц ферросплавов в обмазке, а воздействию микродуг должны подвергаться частицы ферросплава, прилегающие к насыщаемой поверхности.

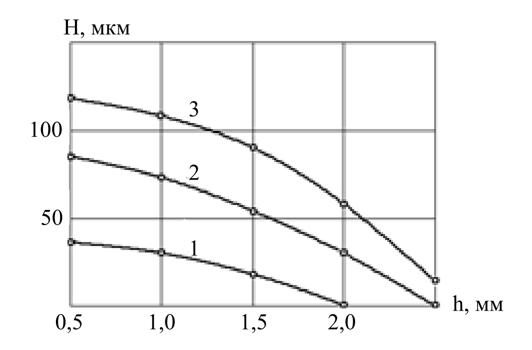


Рис. 3. Зависимость глубины H упрочненного слоя от толщины h слоя обмазки для различного содержания порошка феррохрома (об. %) в обмазке: 1 — 10; 2 — 30; 3 — 50

Обсуждение и заключение. Выполненная расчетная оценка электрической проводимости угольного порошка, используемого для микродугового легирования стальных изделий, позволила установить влияние величины электрического тока в цепи на теплофизические параметры процесса: плотность теплового потока на нагреваемой поверхности, мощность, выделяемую на нагреваемой поверхности, энергию единичного микродугового разряда, возникающего между нагреваемым изделием и окружающей порошковой средой при протекании электрического тока. Полученные результаты позволили определить диаметр частиц ферросплавов, используемых для микродугового легирования, их объемную долю в обмазке, которые обеспечивают достижение наибольшей интенсификации процесса микродугового легирования. Результаты исследований будут использованы при разработке технологических процессов поверхностного упрочнения стальных изделий методом микродугового поверхностного легирования.

Список литературы

1. Mittemeijer E.J., Somers M.A.J. (eds.). *Thermochemical surface engineering of steels.* Woodhead Publishing; 2015. 827 p.

2. Czerwinski F. *Thermochemical treatment of metals.* INTECH Open Access Publisher; 2012. 418 p. http://doi.org/10.5772/51566

3. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. *Плазменная химико-термическая обработка стальных деталей.* Москва: Техносфера; 2012. 464 с.

4. Капуткин Д.Е., Дураджи В.Н., Капуткина Н.А. Ускоренное диффузионное насыщение поверхности металлов при электро-химико-термической обработке. *Физика и химия обработки материалов.* 2020;(2):48–57. https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-2-48-57

5. Александров В.А., Петрова Л.Г., Сергеева А.С., Александров В.Д., Ахметжанова Э.У. Комбинированные плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте. *СТИН.* 2019;(3):13–16.

6. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of laser surface modification on the adhesion strength and fracture mechanism of electroless-plated coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127927. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927

7. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л. Микродуговое оксидирование (обзор). *Приборы*. 2001;(9):13–23.

8. Belkin P.N., Kusmanov S.A. Plasma electrolytic carburising of metals and alloys *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2021;57(1):19–50. https://doi.org/10.3103/S1068375521010038

9. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В. Оценка механических свойств и природа упрочнения диффузионного слоя при микродуговом ванадировании стали. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2018;61(8):625–630. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-625-630

10. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Создание покрытий карбидного типа при микродуговом термодиффузионном вольфрамировании стали. *Материаловедение.* 2018;(1):20–25.

11. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. *Теоретические основы химии угля.* Монография. Москва: Московский государственный горный университет; 2003. 550 с.

12. Еремеева Ж.В., Волкогон Г.М., Ледовской Д.А. *Современные процессы порошковой металлургии.* Москва: Инфра-Инженерия; 2020. 207 с.

References

1. Mittemeijer EJ, Somers MAJ. (eds.). *Thermochemical surface engineering of steels.* Woodhead Publishing; 2015. 827 p.

2. Czerwinski F. *Thermochemical treatment of metals.* INTECH Open Access Publisher; 2012. 418 p. http://doi.org/10.5772/51566

3. Berlin EV, Koval NN, Seidman LA. *Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka stal'nykh detalei.* Moscow: Tekhnosfera; 2012. 464 c. (In Russ.).

4. Kaputkin DE, Duradji VN, Kaputkina NA. Accelerated diffusion saturation of the metal surface during electro-chemical-thermal treatment. *Physics and chemistry of materials treatment.* 2020;(2):48–57. https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-2-48-57 (In Russ.).

5. Aleksandrov VA, Petrova LG, Sergeeva AS, Aleksandrov VD, Akhmetzhanova EU. Kombinirovannye plazmennye sposoby khimiko-termicheskoi obrabotki dlya sozdaniya modifitsirovannykh pokrytii na instrumente. *STIN.* 2019;(3):13–16. (In Russ.).

6. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of laser surface modification on the adhesion strength and fracture mechanism of electroless-plated coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127927. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927

7. Suminov IV, Epelfeld AV, Lyudin VB, Borisov AM, Krit BL. Mikrodugovoe oksidirovanie (obzor). *Pribory.* 2001;(9):13–23. (In Russ.).

8. Belkin PN, Kusmanov SA. Plasma electrolytic carburising of metals and alloys *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2021;57(1):19–50. https://doi.org/10.3103/S1068375521010038

9. Stepanov MS, Dombrovskii YuM, Davidyan LV. Evaluation of the mechanical properties of diffusion layer in the process of microarc steel vanadation. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2018;61(8):625–630. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-625-630 (In Russ.).

10. Stepanov MS, Dombrovskiy YuM. Deposition of carbide-type coatings during micro-arc thermodiffusion tungstening of steel. *Materialovedenie.* 2018;(1):20–25. (In Russ.).

11. Gyulmaliev AM, Golovin GS, Gladun TG. *Teoreticheskie osnovy khimii uglya.* Monograph. Moscow: Moscow State Mining University; 2003. 550 p. (In Russ.).

12. Eremeeva ZhV, Volkogon GM, Ledovskoi DA. *Sovremennye protsessy poroshkovoi metallurgii.* Moscow: Infra-Inzheneriya; 2020. 207 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию 15.12.2023
Поступила после рецензирования 11.01.2024
Принята к публикации 16.01.2024

Об авторах:

Макар Степанович Степанов, доктор технических наук, профессор кафедры управления качеством Донского государственного технического университета, (344002, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), SPIN-код: 3894-8267, ORCID, stepanovms@yandex.ru

Юрий Маркович Домбровский, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344002, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), SPIN-код: 2175-3535, ORCID, yurimd@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.С. Степанов — расчеты электрических параметров порошковой среды и теплофизических параметров микродугового нагрева, анализ полученных результатов.

Ю.М. Домбровский — экспериментальные исследования, определение технологических параметров процесса микродугового поверхностного легирования, анализ полученных результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Received 15.12.2023
Revised 11.01.2024
Accepted 16.01.2024

About the Authors:

Makar S. Stepanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Quality Management Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344002, RF), SPIN-code: 3894-8267, ORCID, stepanovms@yandex.ru

Yuriy M. Dombrovskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344002, RF), SPIN-code: 2175-3535, ORCID, yurimd@mail.ru

Claimed contributorship:

MS Stepanov: calculations of electrical parameters of the powder medium and thermophysical parameters of microarc heating, analysis of the results.

YuM Dombrovskii: experimental studies, determination of technological parameters of the microarc surface alloying process, analysis of the results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



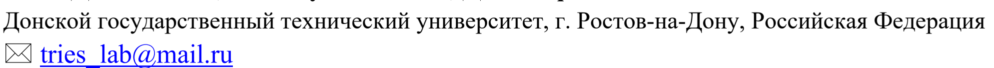
УДК 669.1:66.04
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-88-96

Научная статья

Стимуляция бейнитного сценария превращения внешним магнитным полем



EDN: OWXWVI



Ю.В. Долгачев, В.Н. Пустовойт, Д.В. Нефедов ✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ tries_lab@mail.ru

Аннотация

Введение. Изменение свойств сталей с бейнитной структурой имеет практический смысл, т. к. при бейнитном превращении под воздействием магнитного поля возможно улучшение пластичности стали при сохранении или повышении ее прочностных показателей. Научные изыскания в этой сфере касались вопросов влияния магнитного поля на термодинамику и смену сценария фазового превращения. Однако в открытых источниках нет детального описания воздействия магнитного поля на структуру и свойства продуктов промежуточного бейнитного превращения. Цель работы — исследование особенности влияния внешнего магнитного поля на сценарий и кинетику фазового превращения стали.

Материалы и методы. Исследование проводилось на образцах из стали 65Г. Их химический состав контролировали при помощи оптико-эмиссионного спектрометра Magellan Q8. Термическую обработку (резистивный нагрев) проводили в установке для высокотемпературных исследований «ИМАШ 20–75». Температура нагрева — около 1000 °С, время выдержки — 10 минут. Образец охлаждали при помощи водоохлаждаемых электроконтактов. Внешнее магнитное поле напряженностью 400 кА/м и 800 кА/м создавалось электромагнитом, интегрированным в вакуумную камеру установки.

Результаты исследования. Эксперименты подтвердили возможность смены сценария превращения с перлитного на бейнитный при воздействии внешним магнитным полем до 1 МА/м. Получены изображения микроструктуры и поверхностного рельефа образцов после охлаждения в магнитном поле. Проанализированы кинетические изменения и зависимости объемных скоростей превращения от времени изотермической выдержки. Установлено, что действие постоянного магнитного поля напряженностью 1,6 МА/м увеличивает объемную скорость превращения в 1,808 раза (для стали 65Г) и в 1,687 раза (для стали 45Х).

Обсуждение и заключение. Зафиксированы результаты наблюдений за изменением поверхностного рельефа при охлаждении без магнитного поля и в магнитных полях различной напряженности. Это позволило сделать вывод о стимуляции внешним магнитным полем бейнитного превращения вместо исходного перлитного. Микроструктурные изменения объясняются влиянием поля на магнитное состояние исходной фазы.

Ключевые слова: магнитное стимулирование бейнитного превращения, перлитное превращение, улучшение свойств сталей, микроструктурные изменения сталей, вакуумное травление, магнитострикционные деформации

Для цитирования. Долгачев Ю.В., Пустовойт В.Н., Нефедов Д.В. Стимуляция бейнитного сценария превращения внешним магнитным полем. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):88–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-88-96

Original article

Stimulation of the Bainite Transformation Scenario by an External Magnetic Field

Yuri V. Dolgachev, Viktor N. Pustovoit, Dmitriy V. Nefedov
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
tries_lab@mail.ru

Abstract

Introduction. It makes practical sense to change the properties of steels with a bainite structure, as with bainite transformation under the influence of a magnetic field, it is possible to improve the ductility of the steel while maintaining or even increasing its strength. Scientific research in this area has focused on the influence of the magnetic field on thermodynamics and on the change in the phase transformation scenario. However, there is no detailed description in open sources of the effect of a magnetic field on the structure and properties of the products of intermediate bainite transformation. The aim of the work is to study the peculiarities of the influence of an external magnetic field on the scenario and kinetics of phase transformation of steel.

Materials and Methods. The study was conducted using samples made of 65G steel. Their chemical composition was monitored using a Magellan Q8 optical emission spectrometer. Heat treatment (resistive heating) was carried out in an IMASH 20–75 installation for high-temperature research. The heating temperature was approximately 1000 degrees 1000°C, and the holding time was 10 minutes. The sample was cooled down using water-cooled electrical contacts. An external magnetic field with a strength of 400 kA/m and 800 kA/m was created by an electromagnet integrated into the vacuum chamber of the installation.

Results. The experiments confirmed the potential for altering the transformation pathway from pearlite into bainite in the presence of an external magnetic field of up to 1 MA/m. Images of the microstructure and surface relief of samples after cooling in a magnetic field were obtained. Kinetic changes and dependencies of the volumetric transformation rates on the duration of isothermal exposure were analyzed. It has been found that exposure to a constant magnetic field of 1.6 MA/m increased the volumetric transformation rate by 1.808 times (for 65G steel) and by 1.687 times (for 45H steel).

Discussion and Conclusion. The results of observations of changes in the surface relief during cooling in the absence of a magnetic field, and in magnetic fields of various strengths, were recorded. This has allowed us to draw the conclusion that the external magnetic field stimulates the bainitic transformation instead of the original pearlitic one. Microstructural changes can be explained by the influence of the magnetic field on the initial phase magnetic state.

Keywords: bainite transformation magnetic stimulation, pearlite transformation, improvement of steel properties, microstructural changes in steels, vacuum etching, magnetostrictive deformations

For citation. Dolgachev YuV, Pustovoit VN, Nefedov DV. Stimulation of the Bainite Transformation Scenario by an External Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):88–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-88-96

Введение. Как известно, магнитное поле влияет на термодинамику [1], в частности на равновесную температуру фазовых переходов [2]. Значительного смещения критических температур можно достичь лишь при использовании достаточно сильных (импульсных) магнитных полей [3], что сопряжено с определенными техническими трудностями при реализации в производственных условиях. Опыты свидетельствуют о появлении α-фазы в конструкционных и инструментальных сталях под действием полей напряженностью 1,6–2,4 МА/м [1]. Эти процессы проходят при температурах, которые намного превышают равновесную и не укладываются в предполагаемый по термодинамическим оценкам сдвиг [4]. Влияние внешнего магнитного поля при термической обработке стали выражается в увеличении темпа [5] и дисперсности продуктов превращения [6]. Из [7] известно, что при промежуточном (бейнитном) превращении под влиянием магнитного поля напряженностью до 2 МА/м структурные изменения позволяют получать больший запас пластичности при сохранении или некотором повышении прочностных показателей.

Имеющиеся в γ-фазе области с ближним магнитным порядком при действии внешнего магнитного поля испытывают магнитострикцию. Это происходит из-за магнитной неоднородности аустенита [8] и вызывает изменение в поле упругих сил решетки, причем энергия образования критического зародыша α-фазы уменьшается. Внешнее магнитное поле увеличивает количество и размеры ферромагнитных кластеров [1]. В результате при охлаждении в магнитном поле мультипликативно растет число центров зарождения.

В [9] показано, как ближний магнитный порядок в аустените влияет на смену сценария фазового превращения. Из [10] известно, что магнитное состояние γ-фазы определяет превращение в тот или иной продукт ферромагнитной α-фазы. Это может быть феррит, перлит, бейнит или мартенсит.

Цель представленной работы — экспериментальная проверка возможности смены перлитного сценария превращения на бейнитный при воздействии внешним магнитным полем до 1 МА/м. Кроме того, следует оценить изменение кинетики бейнитного превращения при наложении поля.

Материалы и методы. Использовались образцы одной плавки из стали 65Г. Их химический состав контролировался на оптико-эмиссионном спектрометре Magellan *Q*8 (таблица 1).

Таблица 1

Среднее содержание элементов в образцах

Марка стали	Массовая доля, %							
	C	*Si*	*Mn*	*Cr*	*S*	*P*	*Cu*	*Ni*
65Г	0,65	0,20	0,97	0,21	0,009	0,0012	0,08	0,13

Полированные образцы помещали в вакуумную камеру установки для высокотемпературных исследований «ИМАШ 20–75». Данное оборудование обеспечивает разрежение в рабочей камере $1{,}3\cdot10^{-5} \div 6{,}6\cdot10^{-6}$ Па. Это позволяет реализовать метод вакуумного травления. Структура выявляется в результате испарения в вакууме при высокой температуре под влиянием поверхностного натяжения. При охлаждении в процессе фазовых превращений, сопровождающихся сдвиговыми процессами, на поверхности образца появляется соответствующий рельеф.

Образцы подвергали резистивному нагреву до ~ 1000 °С в течение 10 минут и охлаждали с отводом тепла в водоохлаждаемые медные электроконтакты со скоростью ~28÷32 °С/с. В соответствии с диаграммой изотермического распада аустенита стали 65Г получаемая скорость охлаждения соответствовала пересечению «носа» области начала перлитного превращения. Высокая температура нагрева способствовала росту аустенитного зерна и вакуумному травлению его границ, что требовалось для видеозаписи поверхностного изменения рельефа в процессе фазового превращения.

Для измерения температуры спай термопары приваривали в середине образца. Во время охлаждения протекающие на поверхности процессы регистрировали с помощью цифровой окулярной насадки Eakins. Полученные данные о микроструктуре поверхностного рельефа и внутри образца обрабатывали для определения объемной доли структурных составляющих. С этой целью задействовали аналитическое программное обеспечение SIAMS 800 на 16÷25 полях зрения.

Внешнее магнитное поле создавали электромагнитом, интегрированным в вакуумную камеру установки [11]. В экспериментах задействовали поля напряженностью 400 кА/м и 800 кА/м. Образцы без поля обрабатывали тем же способом, но при извлеченном из вакуумной камеры электромагните.

Результаты исследования. При бейнитном или мартенситном сдвиговом характере превращения на поверхности отполированного образца должен появляться рельеф. Если этого не происходит, речь идет о перлитном превращении. В условиях эксперимента скорость охлаждения была недостаточна для закалки на мартенсит стали 65Г. Можно было ожидать конкуренции между перлитными и бейнитным превращением в зависимости от наличия или отсутствия внешнего магнитного поля в процессе охлаждения.

На рис. 1 представлены скрины видеокадров изменения поверхностного рельефа, наблюдаемого при превращении переохлажденного аустенита в различные моменты времени (τ). Каждой строке на рис. 1 соответствует указанная напряженность внешнего магнитного поля (*H*).

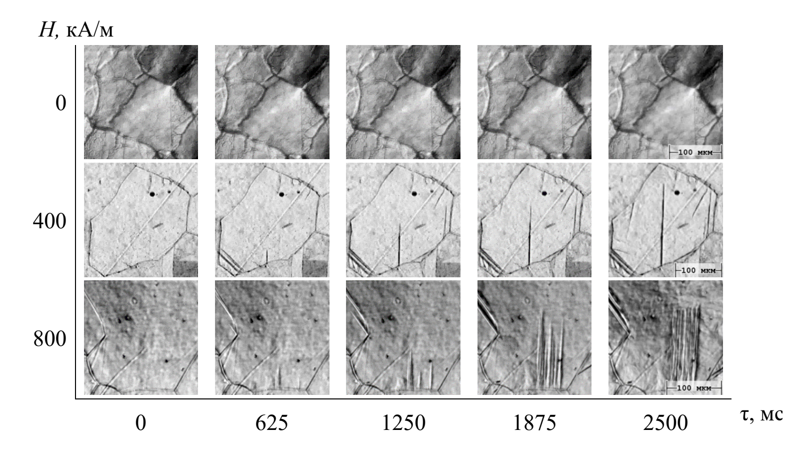


Рис. 1. Изменение поверхностного рельефа во время охлаждения в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля (*H,* кА/м) и времени превращения (τ, мс)

На рис. 2 показаны микроструктуры поверхностного рельефа и внутри образцов после различных режимов обработки.

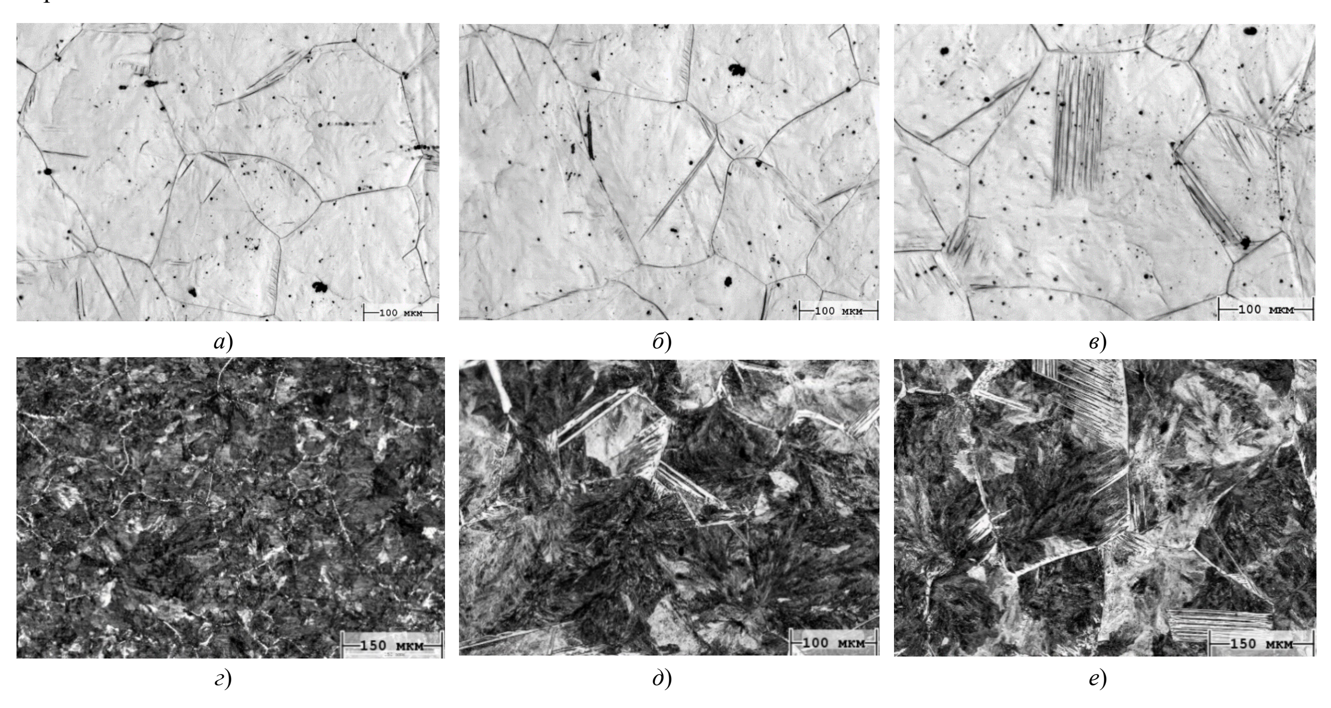


Рис. 2. Микроструктура поверхностного рельефа (*а, б, в*) и внутри образца (*г, д, е*) после обработки: *а, г* — без поля; *б, д* — в магнитном поле напряженностью 400 кА/м; *д, е* — в магнитном поле напряженностью 800 кА/м

При обработке без поля изменения поверхностного рельефа наблюдались лишь в отдельных мелких образованиях (1-я строка, рис. 1 и рис. 2 *а*). На видеозаписи охлаждения зерен аустенита было чуть заметно распространение волнового процесса по поверхности. По-видимому, это отражение фазового превращения. Микроструктурный анализ внутренних слоев образца показал наличие подавляющего количества (98 %) перлитной структуры (рис. 2 *г*).

С наложением внешнего магнитного поля поверхностный рельеф формировали зарождающиеся и растущие бейнитные иглы (2-я строка, рис. 1 и рис. 2 *б*). Эти кристаллы нельзя отнести к мартенситным из-за их медленного роста (рис. 1). С увеличением напряженности поля повышалась интенсивность сдвигового превращения на поверхности (3-я строка, рис. 1 и рис. 2 *в*), образовывался пакетный бейнит.

При действии магнитного поля напряженностью 400 кА/м объемная доля бейнита увеличилась втрое — до 6 % (рис. 2 *д*) по сравнению с обработкой без поля. В магнитном поле напряженностью 800 кАм объемная доля бейнита составляла уже 8÷10 %. Это позволяет сделать вывод о стимулировании смены сценария превращения из перлитного в бейнитное при обработке во внешнем магнитном поле.

Если при охлаждении исходную фазу (аустенит) сохранять как можно дольше, то усиливающийся в ней с понижением температуры ближний магнитный порядок (магнитная неоднородность) в своей критической степени приведет к атермическому мартенситному сценарию превращения. Это известно из [9]. В [1] показано, что наложение внешнего магнитного поля в процессе охлаждения аустенита приводит к дополнительному, вынужденному магнитному расслоению аустенита из-за увеличения количества, размеров и времени устойчивого существования ферромагнитных кластеров. В условиях текущего эксперимента искусственно усиленный внешним полем ближний магнитный порядок в γ-фазе способствует протеканию бейнитного превращения вместо перлитного, естественного для данных условий охлаждения без наложения поля.

Под действием магнитного поля значительно меняется кинетика бейнитного превращения. Об этом свидетельствует отмеченное в ходе эксперимента усиление бейнитной реакции при увеличении напряженности магнитного поля. Кроме того, в [7] рассматривалось наложение внешнего магнитного поля напряженностью 1,6 МА/м при изотермической выдержке различных сталей. Итоги указанной работы также подтверждают сделанное выше заявление о кинетике превращения.

Для выяснения механизма влияния внешнего магнитного поля на кинетику промежуточного превращения учитываются:

– специфика роста бейнитных кристаллов, который зависит от скорости отвода атомов углерода от γ/α границы;

– возникающие при превращении структурные напряжения, обусловленные изменением удельного объема превращающихся фаз.

Данный подход обусловлен тем, что процессы релаксации у межфазной границы сильно заторможены при пониженных температурах [12]. В такой ситуации градиент напряжений вызывает дрейф атомов углерода вопреки концентрационной неоднородности. Это играет определяющую роль в скорости роста нижнего бейнита. Перемещение атомов *C* ведет к снижению его концентрации в объемах γ фазы по фронту роста пластин бейнита. В результате возникает контролируемый концентрационным градиентом диффузионный поток. Он направлен навстречу растущему кристаллу и уменьшает скорость его роста. Зависимости, описывающие эти процессы, есть в работах Л.Н. Александрова и Б.Я. Любова [13].

Под действием внешнего магнитного поля возникают магнитострикционные деформации. Их упругая энергия может вносить определенный вклад в энергию взаимодействия диффундирующих атомов с полем структурных напряжений. Следует ожидать усиления дрейфа углерода и увеличения скорости роста кристаллов α фазы. Скорость роста по механизму дрейфа в соответствии с расчетами Л.Н. Александрова и Б.Я. Любова описывается зависимостью:

$$V = \frac{2PD}{R_{\text{кр}} kT \left(1 - \left(\frac{C_{\text{н.ф}}}{C_0}\right)^{\frac{4}{7}}\right)}. \tag{1}$$

Здесь D — коэффициент диффузии углерода в аустените; $R_{\text{кр}}$ — радиус критического зародыша при данном переохлаждении; $C_{\text{н.ф}}$ и C_0 — соответственно концентрация углерода в α фазе и исходном аустените. P характеризует энергию взаимодействия диффундирующих атомов с полем структурных напряжений, вызванных дилатацией ε при изменении объема в процессе превращения, и находится из соотношения:

$$P = \frac{8}{9}\pi r_a^3 \omega \frac{4\mu\varepsilon m}{(3-4v)(1-m)}, \tag{2}$$

где r_a — радиус атома углерода; ω — параметр, характеризующий в твердых растворах внедрения зависимость постоянной решетки от концентрации атомов растворенного элемента; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\mu = (E / 2) \cdot (1 - v)$ — коэффициент Ламэ (модуль сдвига по направлению [100]); $m = (a - b) \cdot (a + b)$, где a и b — размеры полуосей кристалла в форме эллипсоида вращения.

Расчет по формуле (1) проводили для углеродистой стали при: $C_0 = 0{,}7$; $m = 0{,}9$; $v = 0{,}3$; $\mu \approx 73{,}5$ Гпа; $D = 0{,}0999\, exp\left(\frac{-131300\,\text{Дж/моль}}{RT}\right)\frac{\text{см2}}{\text{с}}$; ε = 0,01; ω = 0,02. Величину Rкр определяли из соотношения $R_{\text{кр}} = 2\sigma / \Delta F_0$. Поверхностное натяжение на когерентной границе σ = 0,2 Дж/м^2; ΔF_0 при $T = 600$ K составляет 315 МДж/м^3. Значение $C_{\text{н.ф}} = 0{,}4$ определяли как концентрацию, соответствующую температуре начала мартенситного превращения (600 K). Найденная таким образом скорость роста кристаллов α фазы составляет $\sim 8 \cdot 10^{-6}$ см/с, т. е. является величиной того же порядка, что и $V_{\text{ср}} \sim 10^{-6}$ см/с, полученная экспериментально для стали 65Г при видеосъемке изотермического образования рельефа.

При включении магнитного поля измерение скорости роста дало те же результаты, т. е. экспериментально не обнаруживается влияние магнитострикционных напряжений на интенсификацию дрейфа.

Допустим, упругое смещение равно истинной магнитострикции парапроцесса $\lambda \approx 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ [14]. В этом случае при $H = 1{,}6$ МА/м и $t = 400$ °C напряжения от магнитострикции составляют $\sigma_\lambda = E_\lambda \approx 10$Мпа. Они вносят весьма малый вклад в энергию взаимодействия диффундирующих атомов с полем структурных напряжений. Это объясняется тем, что величина магнитострикции на два три порядка меньше величины дилатации (0,01 ÷ 0,07 [15]) при сдвиговом γ→α переходе. По этой причине оценка вклада магнитострикции по формуле (1) дает исчезающе малую разницу в значениях скорости роста при обработке без поля и в магнитном поле.

Ускорение процесса образования бейнита можно фактически оценить при помощи уравнения А.Н. Колмогорова [16], устанавливающего связь между степенью превращения, скоростью зарождения и ростом центров новой фазы. Изменение объемной скорости превращения в магнитном поле из-за уменьшения работы образования ферромагнитного зародыша критического размера [1] можно найти по формуле:

$$\frac{\upsilon_H}{\upsilon_0} = exp\left[\frac{w}{kt}\left[1 - \left(1 + \frac{\Delta f^*}{\Delta f}\right)^{-4}\right]\right], \tag{3}$$

где υ — объемная скорость превращения (индексы 0 и H соответственно обозначают условия обработки без поля и во внешнем магнитном поле); W — энергия образования равновесного зародыша; I — намагниченность; H — напряженность магнитного поля; Δf — удельная «химическая» движущая сила; Δf^* — свободная энергия образования одного ферромагнитного кластера [1].

Согласно классической теории Л. Кауфмана и М. Коэна [17], энергия зарождения центров новых фаз равна:

$$W = \frac{952,7 \cdot \theta^2 \sigma^2}{\left(\Delta f + \Delta f^*\right)^4}. \qquad (4)$$

Здесь Δf^* — работа образования ферромагнитноупорядоченных кластеров в аустените; θ — параметр, учитывающий влияние энергии упругих деформаций; σ — поверхностное натяжение. Из [17] известно, что $\theta^2\sigma^3 = 9,92 \cdot 10^{10}$ Дж^5/м^{12}.

Вычисления проводились для температур 543 K (сталь 65Г) и 628 K (сталь 45Х) при напряженности магнитного поля $H = 1,6$ МА/м. Энергия образования равновесного зародыша W определялась при удельной химической движущей силе $\Delta f = 150$ МДж/м^3 с учетом напряженности поля и среднего размера ферромагнитного кластера ~ 1,8 нм [1], для которого получена величина $\Delta f^* = 0,63$ МДж/м^3. Расчет по формуле (3) дает для бейнитного превращения в стали 65Г $\upsilon_H / \upsilon_0 = 1,804$, а в стали 45Х $\upsilon_H / \upsilon_0 = 1,665$.

Зависимости объемной скорости превращения (рис. 3) получены с использованием экспериментальных данных [7] о степени бейнитного превращения в сталях 65Г и 45Х при различных временах изотермической выдержки без поля и в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м.

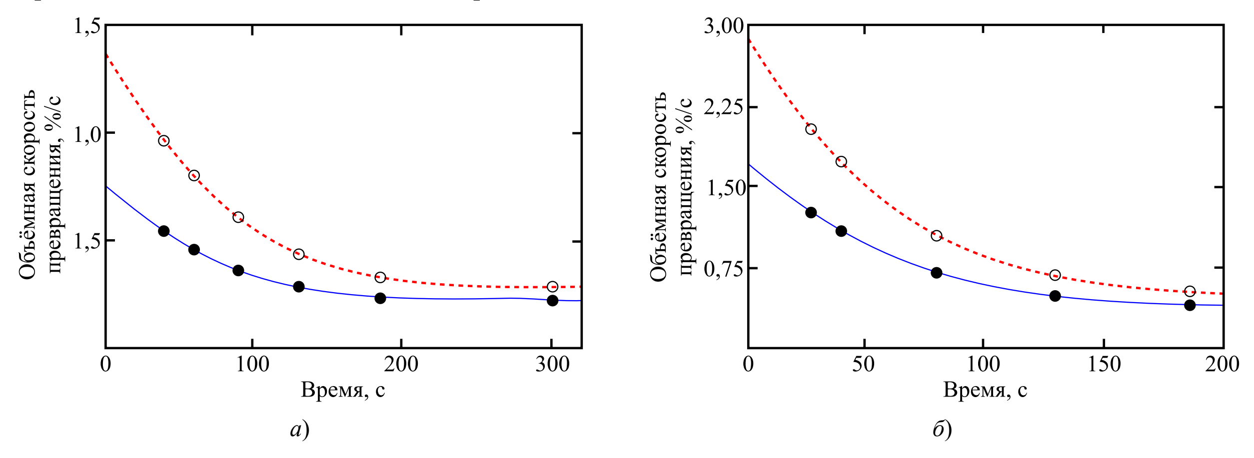


Рис. 3. Зависимости объемной скорости превращения (вертикальная ось, %/с) от времени изотермической выдержки: *а* — для стали 65Г при температуре 375 °C; *б* — для стали 45Х при температуре 320 °C. Синяя кривая отражает данные по обработке без поля, красная — в магнитном поле. На каждой линии отмечены экспериментальные точки

Рис. 3 позволяет рассмотреть отношение объемной скорости превращения при обработке в поле к обработке без поля υ_H / υ в самом начале бейнитной реакции (экстраполированное значение в $\tau = 1$ с). Для стали 65Г получится 1,808, для стали 45Х — 1,687. Это близко к приведенным выше теоретическим оценкам: 1,804 для стали 65Г и 1,665 для стали 45Х. В процессе превращения скорости меняются. Если рассмотреть самые первые экспериментальные точки на графиках, то:

– для стали 65Г при $\tau = 40$ с $\upsilon_H / \upsilon = 1,75$;

– для стали 45Х при $\tau = 28$ с $\upsilon_H / \upsilon = 1,629$.

При более длительной изотермической выдержке отношения объемных скоростей уже мало коррелируют с расчетными.

Заключение. Экспериментально установлено, что, задействуя внешнее магнитное поле, можно сменить сценарий превращения с перлитного на бейнитное. Это объясняется усилением степени ближнего магнитного порядка в аустените в результате увеличения количества и размеров ферромагнитных кластеров в γ фазе под влиянием магнитного поля. С ростом его напряжения увеличивается магнитная гетерогенность аустенита. Как следствие, повышается скорость бейнитного превращения. Расчетные значения увеличения объемной скорости превращения при действии внешнего магнитного поля хорошо согласуются с экспериментальными данными для стартовых скоростей бейнитного превращения.

Список литературы

1. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях.* Москва: Ай Пи Ар Медиа; 2022. 190 с. https://doi.org/10.23682/117033

2. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. *Мартенситное превращение в магнитном поле*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН; 2007. 322 с. URL: https://www.imp.uran.ru/?q=ru/content/martensitnoe-prevrashchenie-v-magnitnom-pole (дата обращения: 28.12.2023).

3. Kaletina Yu.V. Phase transformations in steels and alloys in magnetic field. *Metal Science and Heat Treatment*. 2008;50:413–421. https://doi.org/10.1007/s11041 009 9085 0

4. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A., Mirzaev D.A. Effect of external actions and a magnetic field on martensitic transformation in steels and alloys. *Metal Science and Heat Treatment.* 2016;58:247–253. https://doi.org/10.1007/s11041 016 9997 4

5. Garcin T. *Thermodynamic and kinetic effects of static magnetic field on phase transformations in low alloy steels.* Université Joseph Fourier Grenoble I; 2009. 224 p. https://theses.hal.science/tel 00519996/

6. Feng Wang, Dongsheng Qian, Lin Hua, Huajie Mao, Lechun Xie, Xinda Song, et al. Effect of high magnetic field on the microstructure evolution and mechanical properties of M50 bearing steel during tempering. *Materials Science and Engineering: A.* 2020;771:138623. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138623

7. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Нефедов Д.В. Влияние магнитного поля на кинетику изотермического распада аустенита в области температур промежуточного превращения. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2022;10(269):83–88. https://doi.org/10.35211/1990 5297 2022 10 269 83 88

8. Spooner S., Averbach B.L. Spin correlations in iron. *Physical Review.* 1966;142(2):291–299. https://doi.org/10.1103/PhysRev.142.291

9. Razumov I.K., Boukhvalov D.W., Petrik M.V., Urtsev V.N., Shmakov A.V., Katsnelson M.I., et al. Role of magnetic degrees of freedom in a scenario of phase transformations in steel. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2014;90(9):094101. http://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.094101

10. Razumov I.K., Gornostyrev Yu.N., Katsnelson M.I. Effect of magnetism on kinetics of γ α transformation and pattern formation in iron. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2013;25(13):135401. http://doi.org/10.1088/0953 8984/25/13/135401

11. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Нефедов Д.В. Методика исследования фазовых превращений под действием постоянного магнитного поля на установке для высокотемпературной металлографии. В: *Труды 3 й Междунар. науч. практ. конф. памяти академика А.А. Байкова “Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов”*. Курск: Юго Западный государственный университет; 2022. С. 125–129.

12. Mehrer H. *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion Controlled Processes*. Berlin: Springer Science & Business Media; 2007. 654 p. URL: https://books.google.ru/books?id=IUZVffQLFKQC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false

13. Александров Л.Н., Любов Б.Я. Теоретический анализ кинетики распада пересыщенных твердых растворов. *Успехи физических наук*. 1961;75(9):117–150. URL: https://ufn.ru/ufn61/ufn61_9/Russian/r619d.pdf (дата обращения: 28.12.2023).

14. Кикоин И.К. (ред.) *Таблицы физических величин. Справочник*. Москва: Атомиздат; 1976. 1005 с.

15. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. *Превращения в железе и стали.* Москва: Наука; 1977. 236 с.

16. Колмогоров А.Н. *Избранные труды: в 6 т. Т. 2. Теория вероятностей и математическая статистика*. А.Н. Ширяев (ред.). Москва: Наука; 2005. 581 с.

17. Kaufman L., Cohen M. Thermodynamics and kinetics of martensitic transformations. *Progress in Metal Physics*. 1958;7:165–246. https://doi.org/10.1016/0502 8205(58)90005 4

References

1. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. *Magnitnaya geterogennost' austenita i prevrashcheniya v stalyakh.* Moscow: Ai Pi Ar Media; 2022. 190 p. https://doi.org/10.23682/117033 (In Russ.)

2. Schastlivtsev VM, Kaletina YuV, Fokina EA. *Martensitnoe prevrashchenie v magnitnom pole.* Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007. 322 p. URL: https://www.imp.uran.ru/?q=ru/content/martensitnoe-prevrashchenie-v-magnitnom-pole (accessed: 28.12.2023). (In Russ.)

3. Kaletina YuV. Phase transformations in steels and alloys in magnetic field. *Metal Science and Heat Treatment*. 2008;50:413–421. https://doi.org/10.1007/s11041 009 9085 0

4. Schastlivtsev VM, Kaletina YuV, Fokina EA, Mirzaev DA. Effect of external actions and a magnetic field on martensitic transformation in steels and alloys. *Metal Science and Heat Treatment.* 2016;58:247–253. https://doi.org/10.1007/s11041 016 9997 4

5. Garcin T. *Thermodynamic and kinetic effects of static magnetic field on phase transformations in low alloy steels.* Université Joseph Fourier Grenoble I; 2009. 224 p. https://theses.hal.science/tel 00519996/

6. Feng Wang, Dongsheng Qian, Lin Hua, Huajie Mao, Lechun Xie, Xinda Song, et al. Effect of high magnetic field on the microstructure evolution and mechanical properties of M50 bearing steel during tempering. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;771:138623. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138623

7. Pustovoit VN, Dolgachev YuV, Nefedov DV. Effect of a magnetic field on the kinetics of isothermal decomposition of austenite in the region of intermediate transformation temperatures. *Izvestia VSTU*. 2022;10(269): 83–88. https://doi.org/10.35211/1990 5297 2022 10 269 83 88 (In Russ.)

8. Spooner S, Averbach BL. Spin correlations in iron. *Physical Review*. 1966;142(2):291–299. https://doi.org/10.1103/PhysRev.142.291

9. Razumov IK, Boukhvalov DW, Petrik MV, Urtsev VN, Shmakov AV, Katsnelson MI, et al. Role of magnetic degrees of freedom in a scenario of phase transformations in steel. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2014;90(9):094101. http://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.094101

10. Razumov IK, Gornostyrev YuN, Katsnelson MI. Effect of magnetism on kinetics of γ α transformation and pattern formation in iron. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2013;25(13):135401. http://doi.org/10.1088/0953 8984/25/13/135401

11. Pustovoit VN, Dolgachev YuV, Nefedov DV. Metodika issledovaniya fazovykh prevrashchenii pod deistviem postoyannogo magnitnogo polya na ustanovke dlya vysokotemperaturnoi metallografii. In: *Trudy 3 i Mezhdunar. nauch. prakt. konf. pamyati akademika A.A. Baikova "Sovremennye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoi obrabotki metallov i splavov"*. Kursk: Southwest State University; 2022. P. 125–129. (In Russ.)

12. Mehrer H. *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion Controlled Processes*. Berlin: Springer Science & Business Media; 2007. 654 p. URL: https://books.google.ru/books?id=IUZVffQLFKQC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false

13. Aleksandrov LN, Lyubov BYa. Teoreticheskii analiz kinetiki raspada peresyshchennykh tverdykh rastvorov. *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 1961;75(9):117–150. URL: https://ufn.ru/ufn61/ufn61_9/Russian/r619d.pdf (accessed: 28.12.2023). (In Russ.)

14. Kikoin IK. (ed.) *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik.* Moscow: Atomizdat; 1976. 1005 p. (In Russ.)

15. Kurdyumov GV, Utevskii LM, Entin RI. *Prevrashcheniya v zheleze i stali.* Moscow: Nauka; 1977. 236 p. (In Russ.)

16. Kolmogorov AN. *Izbrannye trudy: in 6 vol. Vol. 2. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika.* Shiryaev AN (ed.). Moscow: Nauka; 2005. 581 p. (In Russ.)

17. Kaufman L, Cohen M. Thermodynamics and kinetics of martensitic transformations. *Progress in Metal Physics*. 1958;7:165–246. https://doi.org/10.1016/0502 8205(58)90005 4

Поступила в редакцию 28.12.2023
Поступила после рецензирования 25.01.2024
Принята к публикации 29.01.2024

Об авторах:

Юрий Вячеславович Долгачев, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов на Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN код: 2774-5346, ORCID, yuridol@mail.ru

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов на Дону, пл. Гагарина, 1), профессор, SPIN код: 7222-6100, ORCID, fipm dstu@mail.ru

Дмитрий Викторович Нефедов, аспирант кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов на Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN код: 5052-6393, ORCID, tries_lab@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. В. Долгачев — получение экспериментальных данных, расчеты, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов.

В.Н. Пустовойт — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Д. В. Нефедов — подготовка образцов для исследования, проведение имитационных испытаний и металлографического анализа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 28.12.2023
Revised 25.01.2024
Accepted 29.01.2024

About the Authors:

Yuri V. Dolgachev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov on Don, 344003, RF), SPIN code: 2774-5346, ORCID, yuridol@mail.ru

Viktor N. Pustovoit, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov on Don, 344003, RF), Professor, SPIN code: 7222-6100, ORCID, fipm dstu@mail.ru

Dmitriy V. Nefedov, Postgraduate student of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov on Don, 344003, RF), SPIN code: 5052-6393, ORCID, tries_lab@mail.ru

Claimed contributorship:

YuV Dolgachev: acquisition of experimental data, calculations, analysis of the research results, preparation of the text, formulation of the conclusions.

VN Pustovoit: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, academic advising, revision of the text, correction of the conclusions.

DV Nefedov: preparation of samples for research, simulation tests and metallographic analysis.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.